Минно-Геоложки Университет

“Св. Иван Рилски” – гр. София

Факултет „Минно-електромеханичен факултет“

Катедра: „Електроснабдяване и електрообзавеждане“

маг. инж. Пламен Кирилов Петров

ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ ПРИ ПОЛУАВТОГЕННИ МЕЛНИЦИ В МИННАТА ПРОМИШЛЕНОСТ

АВТОРЕФЕРАТ

За получаване на образователна и научна степен “Доктор”
По професионално направление:
5.2. Електротехника, електроника и автоматика,
научна специалност “Електроснабдяване и електрообзавеждане (по отрасли)”

НАУЧЕН РЪКОВОДИТЕЛ:

доц. д-р Кирил Сталинов Джустров

доц. д-р Илиян Христов Илиев

София, 2022 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ към Минно-електромеханичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски”, София, на 20.12.2012г, съгласно Ректорска заповед № Р-913 от 14.12.2022г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № Р-939 от 22.12.2022 г. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски” и ще се проведе на 21. 04. 2023г. от 13.00 часа в зала 105 на Минно-електромеханичен факултет, МГУ „Св. Иван Рилски”, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Сектор „Студентска и преподавателска мобилност” на МГУ „Св. Иван Рилски”, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. доц. д-р Мила Илиева Обретенова – председател
2. проф. д-р Васил Димитров, външен;
3. проф. д-р Ивайло Стоянов, външен;
4. доц. д-р Орлин Петров, външен;
5. доц. д-р Христо Ибришимов, външен;

Резервни членове:

2. доц. д-р Теодора Христова, вътрешен;
3. проф. д-р Цанчо Цанев, вътрешен;

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1. проф. д-р Васил Димитров
2. проф. д-р Ивайло Стоянов

Дисертантът е редовен докторант към катедра „„Електроснабдяване и електрообзавеждане““ на Минно-електромеханичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски”, София.

Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от фирма „Трапен“ с която съвместно е усъвършенстван двуконтурен микропроцесорният модул MILLCONT2A за контрол и управление на процеса смилане в полуавтогенни мелници.

Автор: маг. инж. Пламен Кирилов Петров
Заглавие: Изследване на електроенергийната ефективност на полуавтогенна мелница
Тираж: 20 броя
Отпечатано в Издателска къща „Св. Иван Рилски” на МГУ „Св. Иван Рилски”, София.

I. Обща характеристика на дисертационния труд

Актуалност на проблема:

Днес навсякъде по света се работи за повишаване на енергийната ефективност поради все по-нарастващите мощности във всеки един отрасъл. Ето защо търсенето на пътища за повишаване на тяхната ефективност е особено актуален, като се превръща в основно направление на техническо усъвършенстване.

Актуалността на проблема за енергийната ефективност на работата полуавтогенната мелници в минната индустрия е голям. . От това произлиза цялостната насоченост на дисертационния труд – да се изследват преходните процеси при натоварване и разтоварване, консумираната енергия при различни отвори на разтоварните решетки, оптималния ъгъл на падане на рудата в полуавтогенна мелница, както и специфичният разход на енергия при различни режими на работа. Получените резултати ще допринесат за подобряване на енергийна ефективност при процеса смилане.

Полуавтогенната мелница работеща в ДПМ „Челопеч“, с мощност на електродвигателя 5,4MW е един пример за изследване на консумираната енергия при различни режими на работа на процеса смилане, отнесени към входно-изходните параметри. В съвременните производствени условия полуавтогенните мелници представляват един широк клас от машини, предназначени за раздробяване, смилане и/или смесване на материали, като за целта се използват метални сферични тела качеството на работна (мелеща) среда.

Цели и задачи на дисертационния труд

В предоставения дисертационен труд се разглеждат събраните, входно-изходни данни имащи отношение към процеса смилане в, както и работата на електродвигателя задвижващ полуавтогенна мелница.

Поставената цел дисертацията е да се усъвършенства процеса смилане в полуавтогенна мелница, за да бъде спестена енергия, да се намали износването на облицовката, като същевременно да се увеличи производственият капацитет. По време на работата да бъдат използвани модерни изследователски методи и иновативни производствени средства.

Отчитайки извършения анализ и поставената цел са формулирани следните задачи:

1. Да се съберат, обработят и анализират данни със системата MillSense, която осигурява онлайн измерване на ъгъла на падане на рудата в мелницата и консумираната енергия на тон преработена руда.

2. Да се съберат, обработят и анализират данни от проведен експеримент с размери на разтоварните решетки 23mm и 25mm, монтирани в полуавтогенна мелница тип SAG 8,5 x 5,3м.

3. Да се проведат експерименти и да се анализират данни от полуавтогенна мелница, разглеждана като обект на автоматизация при различни режими на работа.

4. Изследване на автоматизирани системи влияещи върху енергийната ефективност при процеса смилане.

5. Да се анализират резултатите от експериментите със създадена за целта диалогова програма за симулация и оценка на ефективността на автоматизирания процес.

Практическа приложимост

- Предложени са модифицирани смилателни модули за полуавтогенна мелница SAG 8,5 x 5,3м (разтоварни гумирани решетки на изхода на мелницата с размери на отворите 23mm и 25mm) с цел получаване по-добри параметри на смления материал при оптимален разход на енергия.
- Предложен е оптимален ъгъл на падане на рудата в полуавтогенната мелница с цел да се намали разхода на енергия за тон преработена руда.
- Изграден е контур включващ дистанционен SRIP и директен SDIP датчици за измерване на ударни импулси генерирани от ударите на рудата в облицовката на полуавтогенната мелница с цел получаване по-добри параметри на смления материал при оптимален разход на енергия.
- Разработена е диалогова програма за симулиране на работата и ефективността на регулатори в едноконтурни системи за автоматично регулиране на процеси в полуавтогенни мелници, която е създадена в Matlab среда.

Апробация

Значителна част от резултатите на работата са представени в дисертацията и публикациите на автора.

Научна новост

Направени са изследвания за подобряване на енергийната ефективност посредством нови и усъвършенствани технически средства за увеличаване на ефективността на процеса смилане в полуавтогенна мелница.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 6 научни статии , от които 2 самостоятелни. Източници на публикуване:

- Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, 2020г.
- Сборник на Национална научно-техническа конференция с международно участие- „Букамк’20 Автоматизация в минната индустрия“, 19-20. 11. 2020г.
- „Рударски гласник“, vol. 1-2,. CXVII, 2020.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **171** страници, като включва увод, **6** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **136** литературни източници, като **88** са на латиница и **38** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **85** фигури и **16** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1. ОБЗОР ПО ПРОБЛЕМА

В съвременните производствени условия в минната промишленост, освен топковите мелници, като най- използваният метод за промяна на размера на частиците, смилане или смесване на материали, широко навлизат полуавтогенните мелници. Полуавтогенните мелници смилат рудата чрез въртене на барабана на мелницата, което води до повдигане на рудата до определена височина. За повдигането спомагат повдигачи (лифтери), намиращи се във вътрешната повърхност на мелницата. След повдигане на материала(рудата), той преминава в режим на свободен полет, започвайки да пада под собственото си тегло. При падането си материала се натрошава и от части смила. Полуавтогенните машини и смилащата среда, която най-често е във сферична форма(топки), които спомагат за смилането.

Полуавтогенната мелница работеща в ДПМ „Челопеч“, с мощност на електродвигателя 5,4MW е един пример за изследване на консумираната енергия при различни режими на работа на процеса смилане, отнесени към входно-изходните параметри. В съвременните производствени условия полуавтогенните мелници представляват един широк клас от машини, предназначени за раздробяване, смилане и/или смесване на материали, като за целта се използват метални сферични тела качеството на работна (мелеща) среда. За разлика от сложния характер на работния процес в полуавтогенната мелница, в конструктивно отношение тя представлява относително просто устройство с проста конструкция. Обикновено, това е цилиндричен съд с конусовидни конични или квадратни краища, монтиран върху подходящ фундамент, който позволява осъществяването на въртеливо движение на съда посредством задвижване от електрически двигател със съответна трансмисия. След зареждане с материала, предназначен за смилане и въртене с определена скорост, процесът на смилане се осъществява благодарение на кинетичната енергия на движещата се в мелницата мелеща среда.

Полуавтогенните мелници намират приложение при разнообразните технологични непрекъснати процеси в, металургичната, минната, циментовата и други промишлености.

При мелниците влияние оказват някои ключови фактори, които подобряват производителността и качеството на изходния продукт. Ключови фактори като: зареждане с определен процент материал за смилане; процент за запълване; скорост на въртене на полуавтогенната мелница; размер на използваните мелещи тела, с което се постига максимална контактна площ между средата и материала за смилане; време за смилане.

В съвременните условия на експлоатация освен технологични, конструктивни и икономически изисквания, също така се отделя внимание на екология, енергийна ефективност, експлоатационна надеждност, както и на човешкия фактор. Полуавтогенните мелници трябва да бъдат с повишена производствена(експлоатационна) надеждност, висока производителност, с минимален разход на енергия. В това число електроенергия, разходи за топлоенергия, но не само в това, вътре влизат и разходи за мелещите тела. Изискване на качеството – изходния продукт трябва да бъде във функция от изискванията по БДС и ISO [25,29].

Разхода на енергия от топковите мелници е функция от много фактори: физическите свойства на рудата (тегло и твърдост); оборотите на барабана и запълването му с топки, режими на работа и управление(автоматичен контрол) на процеса смилане. Големият разход на енергия основно се наблюдава при износването на топките и корпуса на мелницата, триене, нагряване на материала и т. н. Установено е [34, 94], че при движението на топковия товар в мелницата се „губи“ около 85% от изразходената енергия. Затова начина на движението им в голяма степен определя енергоемкостта на мелницата.

1. 1. Типове мелници

Стриващата мелница представлява задвижван от електродвигател въртящ се цилиндричен барабан, който съдържа заредения материал (комбинация от руда, вода и смилаща среда). Мелницата има стоманена, гумена или комбинирана облицовка, която изпълнява функцията на износоустойчива повърхност и защитава вътрешността на мелницата. Най-общо, мелниците се разтоварват през решетка или чрез преливане. За мелниците с разтоварване през решетка частиците, които са по-малки от отворите на решетката се изпомпват от изходящия край на мелницата чрез система от секции за изтласкване на пулпа. За мелниците с разтоварване чрез прелив пулпа просто прелива през разтоварната лагерна шийка на мелницата. Теглото на съдържанието на мелницата с разтоварване през решетка може да варира, докато колебанията при мелниците с разтоварване чрез прелив са относително малки.

Общият тип стриващи мелници и свързаната с тях смилаща среда са:

• Топкови мелници. Мелници с разтоварване чрез прелив, със средно до ниско съотношение на диаметъра към дължината и с относително висок дял на смилащите топки. Обикновено се използват за намаляване на размерите на относително фин входящ материал (обикновено под 12 мм.), какъвто е разтоварването от полуавтогенните мелници с отворен цикъл или за преработване на продукта от мелница със затворен триетапен цикъл.

• Прътовите мелници имат конструкция, подобна на топковите мелници с централно разтоварване. Биват три вида - с централно разтоварване, със странично периферно разтоварване и с централно периферно разтоварване. Използват се за мокро смилане, но тези с периферното разтоварване се използват и за сухо смилане. Смилащата среда представлява стоманени пръти с диаметър от 40 до 110 mm, като дължината им е от 25 до 50 mm по-къса от вътрешната дължина на мелницата. Характерно за тези мелници е, че могат да работят с по-едър захранващ материал, а ефективността на смилане е висока. По-едрите частици поемат удара на прътите, а ситните се предпазват от пресмилане. Поради това те се използват за едностадийно грубо смилане. Прътовите мелници се използват за смилане на руда, въглища и други мокри и сухи приложени. Тези мелници заемат място по средата между полуавтогенните и топковите мелници.

• Автогенни стриващи мелници. Дезинтеграцията и намаляването на размера на някои руди е възможно в рушащите се мелници без помощта на шлифовъчна среда. Мелници за смилане, в които се извършва смилане без помощни средства за смилане известни като мелници за автогенно смилане (AG) или напълно автогенни мелници (FAG). Тези мелниците използват големи буци камък като среда за смилане. Мелници, които използват среден размер скала или камъчетата като смилаща среда също са автогенни мелници, но са известни като камъкови мелници. Мелници които смилат твърди руди с характеристики на счупване, които не се поддават напълно автогенното смилане се зарежда с малко количество стоманени топки, за да помогне в размера намаляване. Те са известни като мелници за полуавтогенно смилане (SAG) в добива, като всички тези видове мелници се използват в минната индустрия. Автогенните мелници се разтоварват през решетка и имат голямо съотношение на диаметъра спрямо дължината за способстване на ударно натрошаване.

• Полуавтогенни стриващи мелници. Използват се големи части руда и относително малка част стоманени топки за подпомагане на ударното разтрошаване. Относително високото съдържание на рудата в мелницата позволява стриване от допира на руда в руда, както и абразивно смилане. Полуавтогенните мелници са с разтоварване през решетки и съотношението на диаметъра и дължината им е средно до високо.

Съдържанието на всяка мелница се нарича „общ товар“ и се състои от рудата и смилащата среда. Смилащата среда се нарича „топков товар“. И двата товара се изразяват като процент от

площта на вътрешното напречно сечение на мелницата и се изчисляват чрез измерване на нивото на съдържанието (повърхност на товара спрямо „покрива“ от облицовка на мелницата) по време на спиране и преглед на мелницата. За измерване на товара на топкова мелница последната трябва най-напред да бъде разтоварена, като в нея остане само минимално количество руда. По принцип типичната мелница работи при следните условия на зареждане:

Автогенна	Общо = 20% - 35%	Топки = 0%
Полуавтогенна	Общо = 20% - 35%	Топки = 1% - 15%
Първична	Общо = 20% - 35%	Топки = 15% - 35%
Топкова	Общо = 35% - 40%	Топки = 35% - 40%

1. 1. 1. Дизайн на AG / SAG мелници.

Смилането и намаляването на размера на рудите в мелниците AG / SAG се дължи на комбинация от сили на удар, износване и абразия по време на въртене на мелницата. Частици на пръста на мелничният заряд получава максималните сили на удар от падащи скали и друго смилане медии. Частиците в тялото на мелничния заряд частично се плъзгат от различни височини и са подложени на износване и абразия, водещи до намаляване на размера. Следователно работата на мелниците AG / SAG включва използването на по-евтини смилащи среди, като заместване на скъпи стоманени топки и пръти, които силно влияят върху износването на облицовките. Те следователно са по-евтини в експлоатация. Необходимо е рудата да осигурява достатъчно количество количество бучки, което би продължило разумно време, за да действа като смилаща среда. Такива рудите са описани като компетентни руди. Рудите, които лесно се разпадат, се наричат и двете некомпетентна или некомпетентна руда. В последно време тези мелници успешно замениха конвенционалната мелница с мелнични топки конфигурации, здравей Австралия, броят на мелниците AG / SAG се увеличи от около шест през 1984 г. До повече от 40 през следващия петгодишен период [29]. Броят на инсталациите в световен мащаб от в средата на 1989 г. е около 471 и в момента броят им нараства. Един от основните интереси в тези мелници е възможността за премахване на поне един етап на смачкване от конвенционалните процеси за намаляване на размера. Такива замествания водят до спестяване на капиталови разходи в даден завод дизайн. Мелниците SAG са били използвани най-вече за смилане на твърдо злато и медни руди с кварц, ултрамафичен или зелен камък като гостоприемни скали. Индексът на свързване на тези руди варира между 12 -14 kWh / t. Впоследствие приложението на мелницата SAG е разширено до по-меки руди, като боксит и глинести твърди златни руди. Тази глава разглежда развитието на дизайна и работата на двете автогенни и полуавтогенни системи за смилане, за намаляване на размера при металургични операции.

Тъй като смилането на руда в мелниците AG / SAG се дължи най-вече на въздействие върху частици и среда то височината в тези мелници обикновено имат голямо съотношение диаметър / дължина (D / L). Обаче това съотношението варира и се използват и мелници с голямо съотношение дължина към диаметър, например в Южна Африка.

Понастоящем трите типа мелници, които се произвеждат в търговската мрежа, имат следните характеристики:

Мелници с голямо съотношение D / L, (Мелници с висок аспект) D / L = 1,5 - 3,0

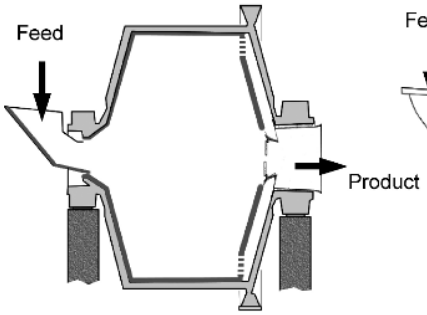
Мелници с равни D и L (квадратни фрези) D / L = 1

Мелници с малко съотношение D / L или високо D / L = 0,33 - 0,66

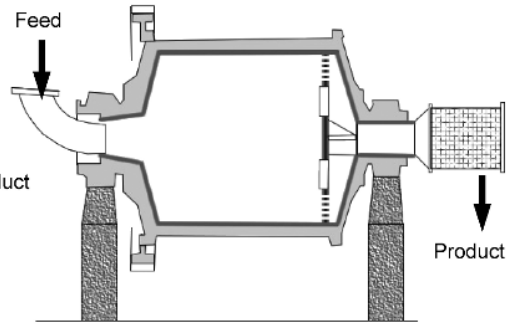
съотношение L / D (Мелници с нисък аспект) (Д / Г = 1,5 -3,0)

Мелниците са проектирани с конусовидни конични краища (фиг. 1. 1.) или квадратни краища (фиг. 1.2.). Висок аспект мелници с конусовидни краища понякога се наричат мелници за палачинки, докато мелници с квадратните краища се наричат квадратни мелници. Диаметрите и дължините на

квадратните мелници са почти равен. Някои сухи автогенни мелници, работещи в Канада, са с диаметър 8,5 m и дължина 1,5 m. Те са известни като Aerofall мелници. Влажната мелница SAG на Cadia Hill (Австралия) е 12,2 m инча диаметър с 20 MW двигател и през 2004 г. беше най-големият диаметър в експлоатация в света. Размерите на мелницата с диаметър до 13,4 m се считат за осъществими с настоящата технология [95]. През 2004 г. е построена най-голямата мелница в света за Тарква, Гана. Мелницата е 8,23 m диаметър с 12,19 m ефективна дължина на шлайфане (EGL) или вътрешна дължина на облицовката. Мелницата работи в едностепенна шлифовъчна верига. Повечето мелници AG и SAG имат стоманени и гумени облицовки с прорези и са снабдени с повдигащи пръти. Облицовките са или вълнообразни, или решетъчни. Решетъчните облицовки се използват все по-често поради по-дългият им живот, дължащ се на задържането на руда и топчета в решетките. Заловените руди а топките изграждат твърда повърхност върху облицовките, предпазвайки ги до известна степен от износване. Настоящата тенденция е да се използват композитни облицовки с повдигачи в подаващия край на мелница за инициране ударно раздробяване, последвано от вълнови облицовки по останалата част от дължината на мелницата. Няколко непрекъснато се опитват комбинации за подобряване на живота на обвивката и черупката. Основният обект на дизайнът на подложката е да насърчава смилането чрез удар и износване вместо абразия. Изпускателните краища са снабдени с решетъчни решетки, действащи като мембрана, която задържа по-големите частици се изхвърлят в продуктовия поток. Размерът, разстоянието и дизайнът на дупките в диафрагмата са важни, тъй като влияят върху скоростта на пропускателната способност и размера на продукта. Разреждането с отворен край помага за решаването на проблеми, възникващи в резултат на високоскоростното въртене на мелницата в регион, където скоростта надвишава 90% от критичната скорост. За подобряване на ефективността на диафрагми при високи скорости на въртене, са използвани извити повдигачи [94].



Фиг. 1. 1. Високо съотношение AG/ SAG мелница с решетъчни и конични краища



Фиг. 1. 2. Квадратна AG / SAG мелница с решетка

Захранващите устройства са тип течки или улей. Мелниците с нисък аспект обикновено се виждат с течки, захранвачи, докато мелниците с висок аспект са оборудвани с улеи. Като общо правило улеят отворът е около 4 пъти по -голям от най -големия скален размер, 100% от който трябва да премине надолу улеят. Мелниците AG/SAG обикновено получават руда директно от дробилните инсталации с алтернативни договорености за получаване на руда от запас, много редки случаи рудата е директно от мината.

Схематични диаграми на типична полуавтогенна мелница с голямо съотношение D/L (фиг. 1.1) и а квадратна мелница (фиг. 1.2) са илюстрирани по -долу. Използват се различни решетки с различна геометрия на отворите, номера и размери. Някои решетки имат конусни отвори. Основната идея е да се предотврати натрупването на посредници вътре в мелницата, което след период на експлоатация има тенденция да се натрупва и да инхибира скоростта на производство.

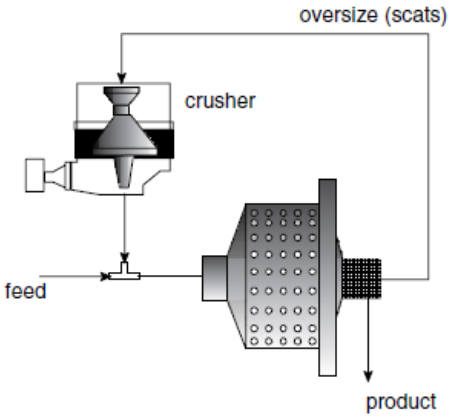
1. 1. 2. Проектиране на вериги AG/SAG

Често използваните схеми за мелници AG/SAG са:

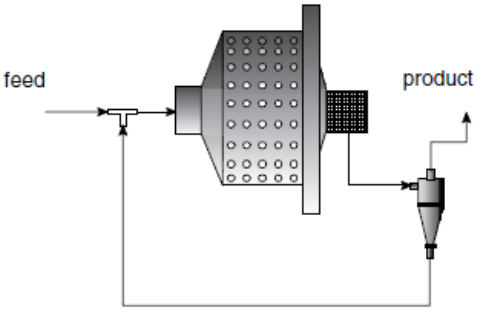
1. отворена верига с trommel или екран като класификатор,
2. затворен кръг с циклонен класификатор,
3. отворен кръг със сферична мелница със затворен кръг, и
4. отворен кръг, последван от вторична трошачка и след това точене.

Първите два типа могат да се нарекат едноетапни, докато последните два са двустепенни операции. Повечето мелници AG/SAG работят в отворена верига (фиг. 1.3.), когато размерът на продукта е обикновено груб. Съществува разпоредба за инсталиране на класификатор като право сито, бутара или наклонено сито, за да премахнете камъчета с критичен размер. За по -фини и повече еднороден продукт, смилане със затворен кръг с класификатори, като хидроциклон, обикновено е заети (фиг. 1. 4).

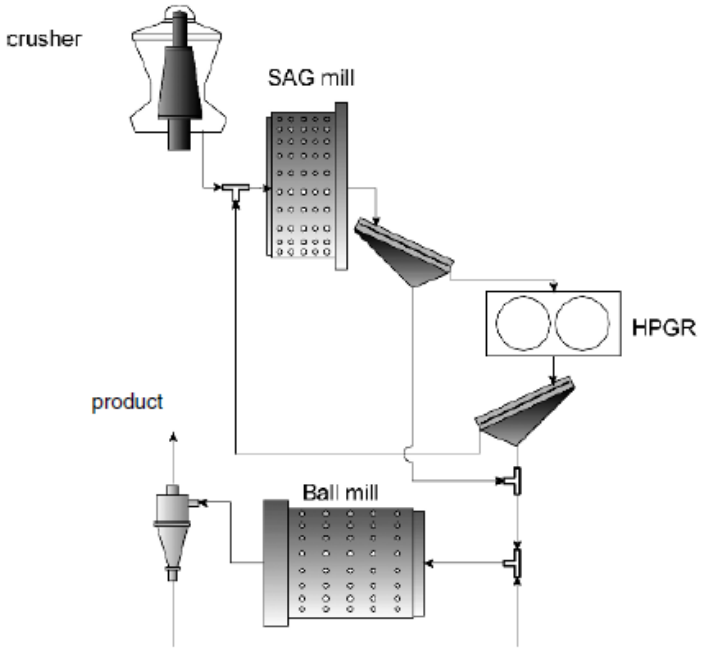
Основният проблем при проектирането и експлоатацията на верига AG/SAG е тенденцията към натрупване 25-50 мм част от заряда, която възпрепятства пропускателната способност. Този конкретен размер фракцията, която се натрупва в мелницата, се нарича критичен размер. Следователно предварителното лечение на захранването трябва да бъде такова, че присъствието на тази фракция да е минимално. Ако натрупването на критични размерът на камъчетата е твърде голям 50 - 90 мм прорези се изрязват в решетката (отвори за камъчета), за да се позволи изхвърляне от мелницата. Тези скали се раздробяват, преди да се върнат в мелницата SAG или преминаване към топка мелница в ABC (автогенна/топка мелница/трошачка) верига (фиг. 1. 3 и 1. 4). Вместо да се рециклира по -голямата фракция, извънгабаритният продукт от мелниците AG/SAG е понякога се предотвратява изпускането от мелницата чрез използване на обратна спирала при изпускането край и се промива обратно в мелницата за по -нататъшно смилане [81].



Фиг. 1. 3. AG / SAG мелница с отворена верига



Фиг. 1. 4. AG / SAG мелница със затворена верига



Фиг. 1. 5. AG / SAG мелница със затворена верига с рецикъл

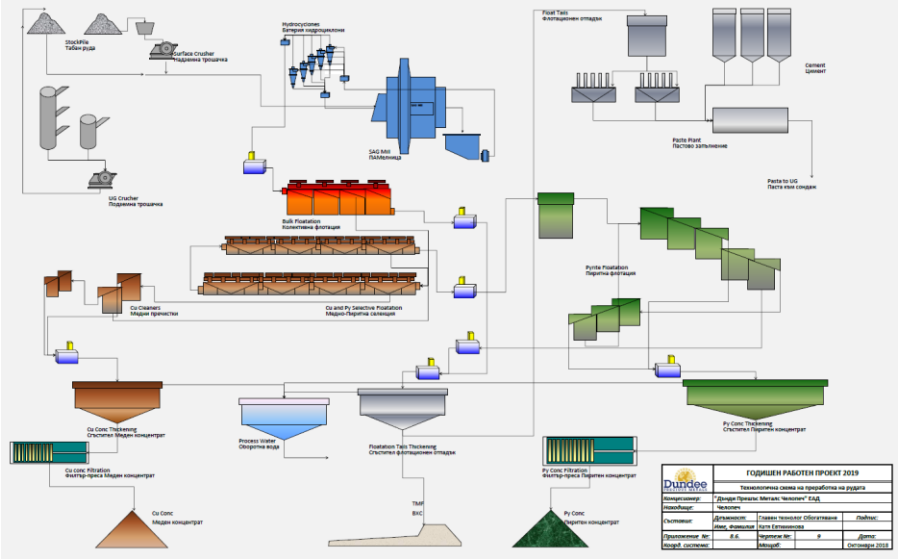
Изводи

От направения литературен обзор може да се заключи, че са разгледани изследвания в областта на мелници за мокро смилане, засягащи факторите, влияещи на процесите надробяване и смилане на различни видове материали. Обърнато е внимание на първичните и вторичи процеси, като са разгледани машини за надробяване на руда. Представени са основните видове полуавтогенни мелници, както и техният метод на зареждане и разтоварване.

Глава 2. КОНСТРУКТИВНИ И ТЕХНОЛОГИЧНИ ФАКТОРИ ЗА ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ПРОЦЕСА СМИЛАНЕ

2.1. Преработка на руда в ДПМ „Челопеч“

В Обогатителната фабрика на “Дънди Прешъс Металс Челопеч” ЕАД се преработва рудата, добивана в рудник “Челопеч”. Оперирането на процесите на преработка на рудата е автоматизирано. Оператор в контролна зала контролира и управлява всички параметри на машините и процесите и осъществява непрекъсната комуникация с персонала в цеховете. Създадените оперативни центрове в рудника и във фабриката през 2019 бяха заменени от пилотен SMART център за управление на производствените процеси в реално време, позволяват извършването на мониторинг на работната среда за допускане до безопасна работа и наблюдение и комуникация при ликвидиране на аварии.



Фиг. 2. 1. Технологична схема на работа в обогатителната фабрика на “Дънди Прешъс Металс Челопеч” ЕАД

2. 1. 4. 2. Полуавтогенната мелница

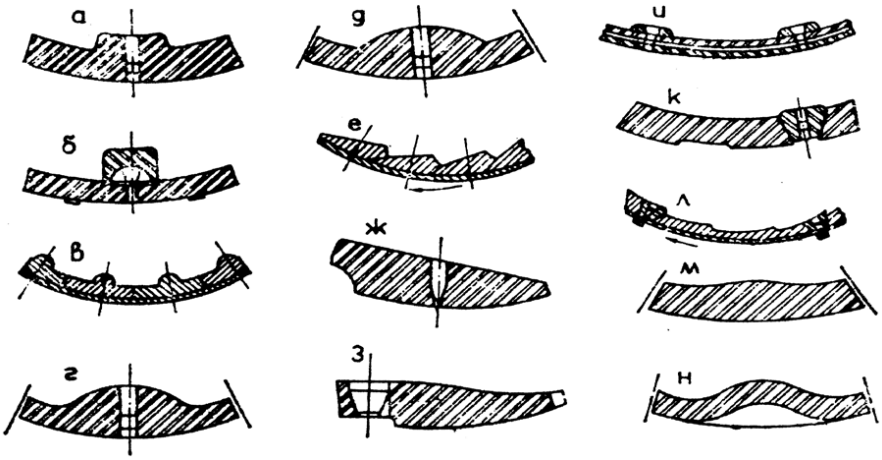
Полуавтогенната мелница (ML-1303) представлява съоръжение с разтоварване през решетка и с диаметър 8,534 м х 4,73 м ефективна дължина на смилане, с вариа-торен индукционен електродвигател. Мелницата работи в затворен цикъл с батерия хидроциклони (CY-1301). Полуавтогенната мелница включва товарни клетки, вградени към лагерите от страната на входа, които измерват реалното натоварване на мелницата, както и нейното тегло. Мелницата е изцяло облицована със стомана

Фиг. 2. 4. Полуавтогенна мелница

2. 1. 4. 2. 1. Вътрешна облицовка на мелница (Лифтери)

Конструктивна особеност на някои топкови мелници е наличието на така наречените повдигачи (лифтери), представляващи греди, разположени надлъжно по вътрешната обшивка на тялото на мелницата [64,146]. Самата обшивка може да има различни профили и служи да предпазва от износване вътрешната стена на мелницата. При въртеливото движение лифтерите имат за цел да повдигат на по-високо ниво съдържанието на мелницата преди то да падне обратно на дъното, като по този начин се осигурява по-добро раздробяване на материала. В някои случаи лифтерите могат да бъдат спираловидно разположени по дължината на мелницата, с което се постига по-плавно движение на смилаемия материал. Броят на разположените лифтери зависи пропорционално от диаметъра на цилиндричното тяло на мелницата.

От особено значение е бързото ремонтиране, отстраняване на повредени или износени лифтери. За да осигурява висока надеждност, конструкцията на лифтерите трябва да осигурява лесен монтаж, демонтаж и подмяна. На (Фиг. 2. 5**)** сапоказани различни профили. Освен мелещите тела е важен и видът на облицовката. Тя влияе на работата на мелницата. Профилите, представени от [8], показани на **фиг. 1. 4 - а, б, в, е**, **ж** са формирани от отделни плочи, които се закрепват към барабана посредством болтове. При останалите профили от **фиг. 1. 4 - г, д, и, к, л, м, н** закрепването се осъществява със стоманени греди. Те са закрепени с болтове към барабана на мелницата.

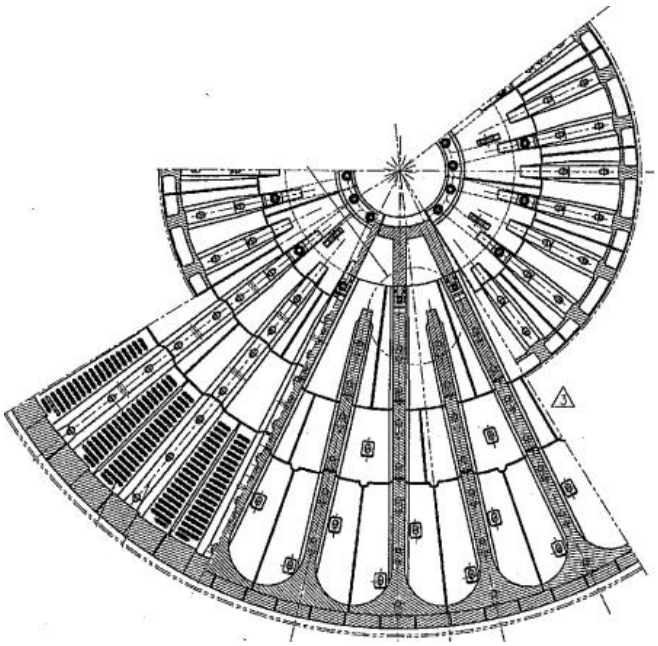


Фиг. 2. 5. Различни профили за облицовка [8]

За фино смилане на материала, [7] предлага използването на гладка облицовка (Фиг. 2. 6. **)**, имаща за цел да осигурява стриващо действие.

Фиг. 2. 6. Гладка облицовка [7]

Формата и профилите на облицовките, използвани за предпазни плочи и лифтери оказват съществено влияние върху производителността и ефективното смилане на изходния продукт. Различните профили на облицовките и лифтерите имат различен точков и повърхностен контакт, който те осъществяват с материала за смилане и мелещите тела. На (Фиг. 2.9.) е показана профил на облицовка на цилиндъра и асеблирана облицовка на разтоварвашия капак (Фиг. 2.10.) на полуавтогенна мелница SAG 8,5 х 5,3м в ДПМ „Челопеч“[123].

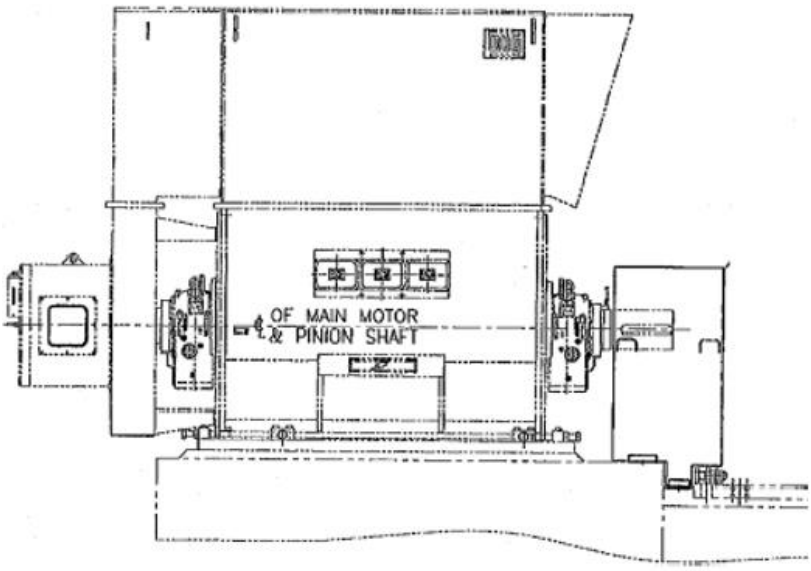


Фиг. 2. 10. Асеблирана облицовка на разтоварвашия капак на полуавтогенна мелница SAG 8,5 х 5,3м

2. 1. 4. 2. 5. Задвижване на полуавтогенна мелница

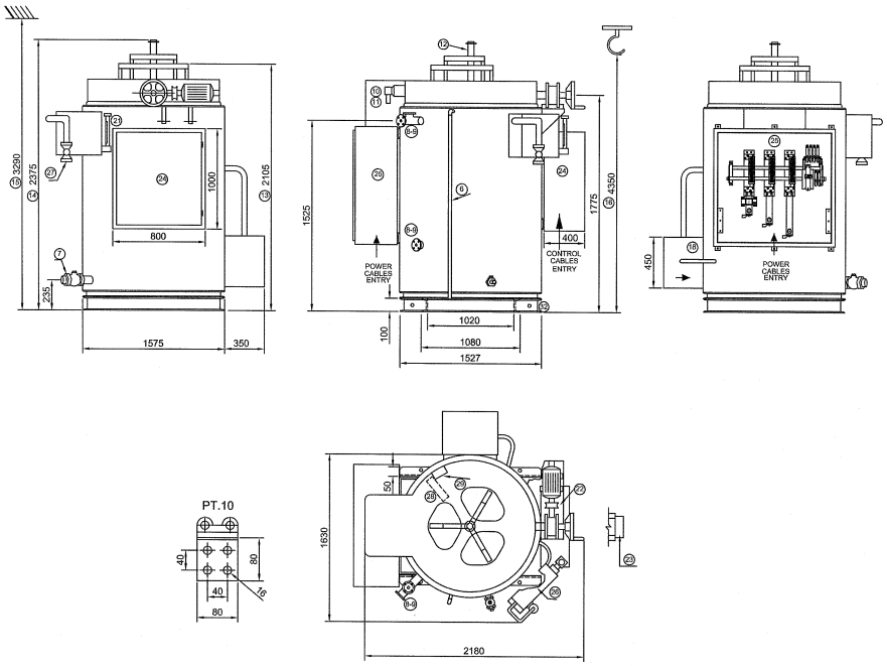
Задвижващата система на полуавтогенната мелница се състои от:

Електродвигател на полуавтогенната мелница с навит ротор, с мощност 5400 kW при 100% синхронна скорост (994 об. мин. на електродвигателя) (Фиг. 2. 10. **)**.



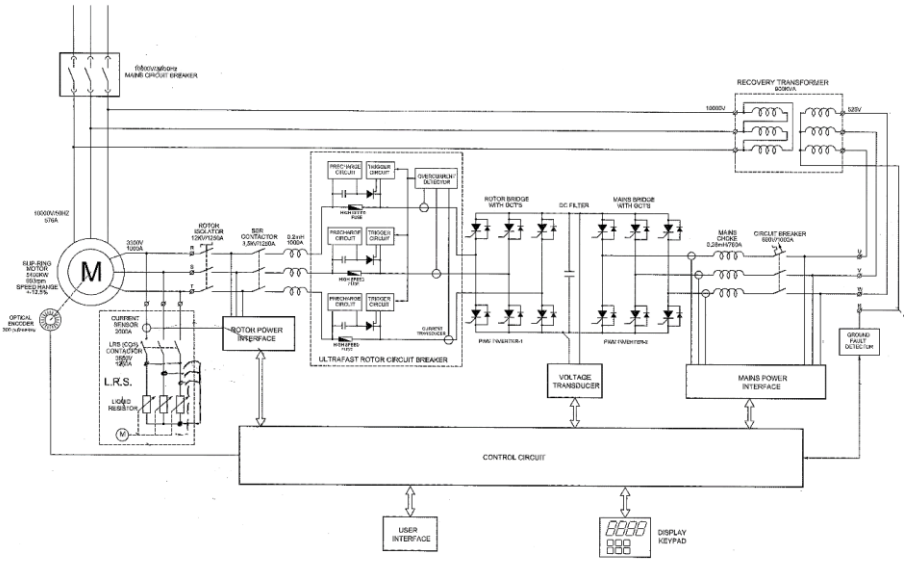
Фиг. 2. 10. Електродвигателя на полуавтогенната мелница

• Течносъпротивителен стартер (Фиг. 2. 11), с контактори за стартера и за шунтиране. Електродвигателят се включва с течносъпротивителния стартер и след достигане на минималните работни обороти, управлението се прехвърля на системата за възстановяване на енергията при приплъзване.



Фиг. 2. 11. Течносъпротивителен стартер на електродвигателя полуавтогенната мелница

- Система за възстановяване на енергията при приплъзване (SER), използвана за промяна на оборотите на електродвигателя на мелницата. Тази система включва задвижването от тип SER и възстановителния трансформатор (Фиг. 2. 12. **)**[5].
- Система за повдигане и смазване на електродвигателя.
- Система за механично задвижване с редуктор, пиньон и зъбен венец.
- Двигател за придвижване на тласъци и палцов съединител.
- Система за смазване на лагерите на шийката.
- Система за смазване на лагерите на редуктора и шийката.
- Система за гресиране на зъбния венец.



Фиг. 2. 12. Система за възстановяване на енергията при приплъзване на електродвигателя на полуавтогенната мелница

Електродвигателят на полуавтогенната мелница има собствена система за смазване (Фиг.2.13. **)**, която довежда смазващото вещество до лагерите от страната на задвижването и от незадвижващата страна. Системата включва една повдигаща помпа за високо налягане (PP-1313), която повдига вала от лагерите при първоначалното пускане на електродвигателя на мелницата. След това се включват смазочните помпи с ниско налягане (PP-1312 A/B в конфигурация дежурна / резервна), които мажат лагерите при нормална работа[100].

Изводи

Представена е Технологична схема на работа в обогатителната фабрика на "Дънди Прешъс Металс Челопеч", както са и описани са конструктивните и технологични елементи в процеса смилане. В конструктивните елементи е описано оборудване, което пряко участва в процеса: захранващи ленти (ГТЛ), ГТЛ системата за връщане на отломките, полуавтогенна мелница, вътрешна облицовка (като са коментирани различни форми лифтери и разтоварни решетки), батерия хидроциклони, задвижващ електродвигател с управляваща апаратура. Приложена е графика на консумирана мощност за различни критични обороти на мелницата и нива на общият товар при 6% топки е показан на фигура, от която се вижда, че при най-голям общ товар, косумираната мощност е най –голяма или зависимостта между двете величини е линейна.

Глава 3. ИЗБОР НА ИНФОРМАЦИОННО - УПРАВЛЯВАЩА СТРУКТУРА НА СИСТЕМАТА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ПОЛУАВТОГЕННАТА МЕЛНИЦАТА

3.1. Подходи за теоретично изследване на различни методи, средства и автоматично управление на смилателни процеси с ПИД регулатор

Контрола на процесите е популярна тема. Как може да да се реши дали трябва да се добави контрол към съществуваща система? Разширеният контрол се използва за подобряване на производителността, стабилизира производството, борави с ограниченията, защитава оборудването и управлява промените. Повечето фабрики използват контролери за обратна връзка, обикновено PID(пропорционални, интегрални, производни) контролери. Това е обичайно за разработват специални схеми за управление, за да се справят с по –сложни процеси. В класическия PID контрол на процеса, контролер носи един стойност, близка до зададена точка, използвайки единична манипулирана променлива. Обект за регулиране(ОР) е технически апарат, който е свързан с входни, изходни, междинни регулируеми величини и смущаващи въздействия. Входните променливи се класифицират на :

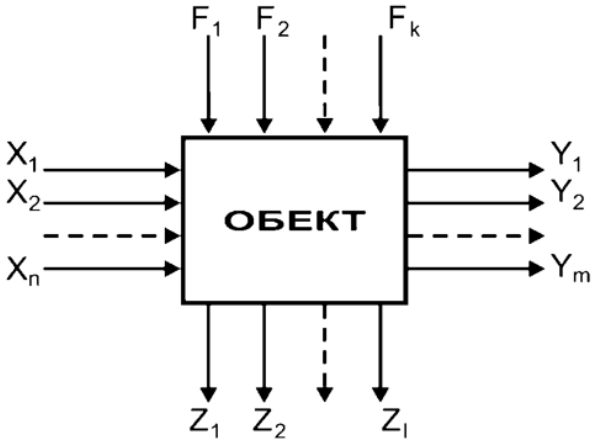
- управляващи променливи(u),когато техните стойности могат да бъдат променяни ръчно от човека или от управляващите устройства.
- смущаващи променливи(z),които са неуправляеми и могат предизвикат отклоненията от нормалния режим на работа. Тези променливи могат да бъдат предварително известни функции от времето, т. е. да бъдат детерминирани.

Изходните променливи се класифицират:

- измерими изходни променливи-ако техните стойности са известни чрез прякото им измерване;
- неизмерими изходни променливи- те не могат да бъдат пряко измерени.
- Междинни регулируеми величини

Входните параметри характеризират управляващи въздействия върху процеса и се бележат с x. Изходните параметри определят ефекта от управляващи въздействия върху процеса върху и се бележи с y. Ако x и y не се променят, то ОР е в равновесно или статично състояние. Смущаващите въздействия F са входни величини, които нарушават процеса автоматично регулиране. Междинните регулируеми величини (Фиг.3.1.)[19].

3. 2. Обект за автоматизация

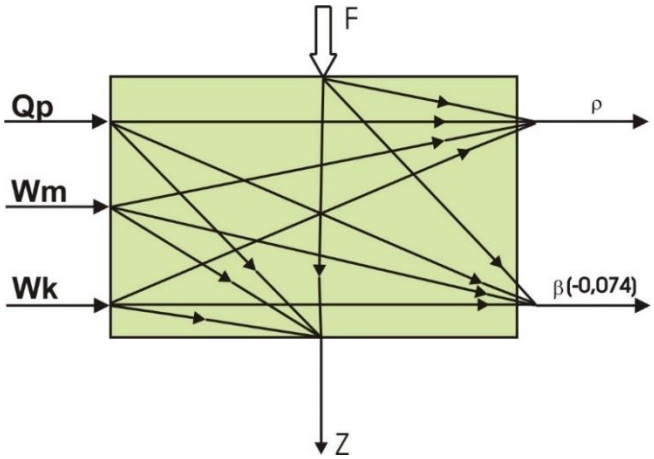


Фиг. 3. 1. Входно изходно въздействия върху обект за автоматизация

XI – Входни величини(управляващи въздействия)
YI – Изходни величини(регулируеми величини)
ZI – Междинни регулируеми величини
FI – Смущаващи въздействия

3. 3. Полуавтогенна мелница като обект за автоматизация

По каналите за управление при процеса смилане в полуавтогенна мелница може да се представи със структурата, показана на (Фиг. 3. 2), където:



Фиг. 3. 2. Каналите за управление върху обект за автоматизация

Управляващи въздействия

Qp – количество руда;
Wm – количество вода, подавана във мелницата;
Wк – количество вода, подавана в класификатора;

Междинни регулируеми величини

Z – косвено контролируем параметър(локалната резонансна честота на вибрация на корпуса на мелницата);

Смущаващи въздействия

F – смущаващи въздействия(измененията на физико-механичните и химико-минералогичните свойства на рудата, износването на топковия товар и бронеоблицовката);

Изходни регулируеми величини

ρ - плътността на пулпа на прелива на класификатора;
β(-0,074) – процентното съдържание на контролираната класа[24].

3. 4. Избор на типа на регулаторите и законите за регулиране

Основно изискване към системата за автоматизация е да реализира оптимален преходен процес, т. е. да удовлетворява зададените технологични изисквания. Ето защо определянето на параметрите за настройка на регулатора е особено важен момент при въвеждането на системата в редовна експлоатация. Методите за настройка на регулатора могат да се обособят в няколко групи, едната от които е тази на приблизителните (инженерни) методи. Те използват графики, номограми

или готови рецепти (формули), които изразяват определени зависимости между параметрите на обекта и регулатора за трите типа преходни процеси: апериодичен преходен процес с минимално време на регулиране, процес с 20%пререгулиране и минимално време на първия полупериод и процес с минимална стойност на квадратичния интегрален критерий [8,140]. В тези случаи се допуска, че апроксимацията на обекта може да се извърши с апериодично звено от първи ред (за обекти със самоустановяване) или интегриращо звено (за обекти без самоустановяване) плюс звено с чисто закъснение. Подходите за теоретично изследване на различни методи и средства за автоматизация се използват при избора на типа на регулатора и закона на регулиране. Блоковата схема на алгоритъма е дадена на (Фиг. 3. 3). Последователността на работа е следната [18]:

1. Въвеждат се параметрите на обекта K_o, τ_o, T_o
2. Определя се съотношението τ_o/T_o
3. Ако това съотношение е по-малко от 0,2 може да се избере позиционен (релеен регулатор).

Областта на приложение на позиционните регулатори е ограничена до обекти с малка инерционност и при които не се изисква висока точност на стабилизация.

4. Ако $0,2 \le \frac{\tau_o}{T_o} \le 1$ се избира непрекъснат закон на регулиране. В този случай последователността на настройката на ПИД регулатор при апериодичен преходен процес е следната:

4. 1. Изчислява се $K_p = \dfrac{0,6}{\dfrac{\tau_o}{T_o} \; K_o}$ (3. 1)

4. 2. Изчислява се $T_И = (0,6 \div 0,7)\, T_o$ (3. 2)

4. 3. Изчислява се $T_Д = (0,1 \div 0,2)\, T_И$ (3. 3)

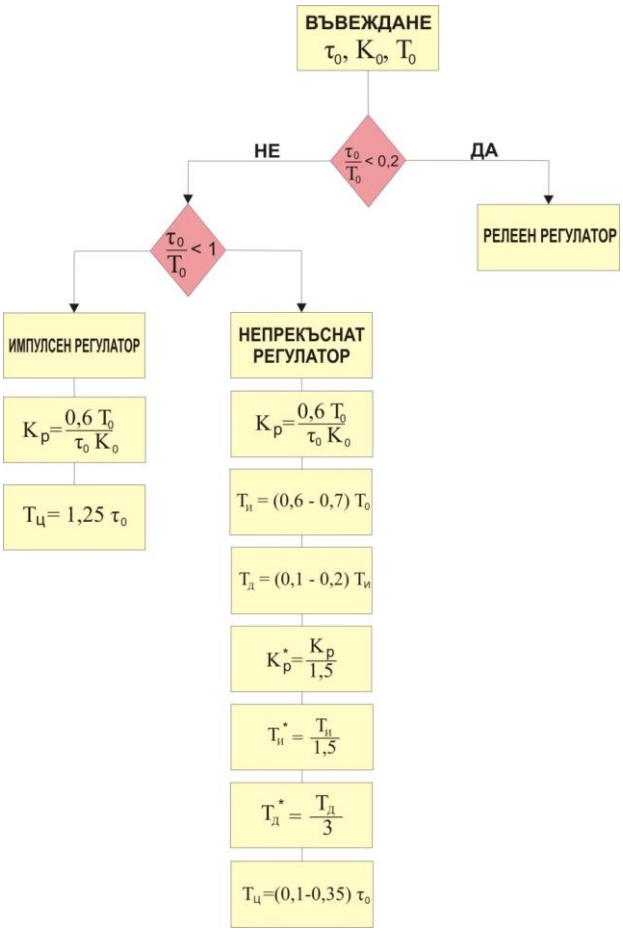
4. 4. В случай на използване на цифров (микропроцесорен) регулатор се коригират така изчислените настройки по следния начин:

$$K^*_p = \frac{K_p}{1,5};\; T^*_И = \frac{T_И}{1,5};\; T^*_Д = \frac{T_Д}{3} \qquad (3.\ 4)$$

За колебателен преходен процес с 20% пререгулиране $K^*_{р.\ кол} = 1,7\, K^*_{р.\ апер.}$

4. 5. Определя се такта на управление [134]

$$T = (0,1 \div 0,35)\, \tau_o \quad (3.\ 5)$$



Фиг. 3. 3. Блоковата схема на алгоритъм за избора на типа на регулатора и закона на регулиране[135]

3.7. Подходи за теоретично изследване на различни методи, средства и автоматично управление на смилателни процеси с АСР регулатор

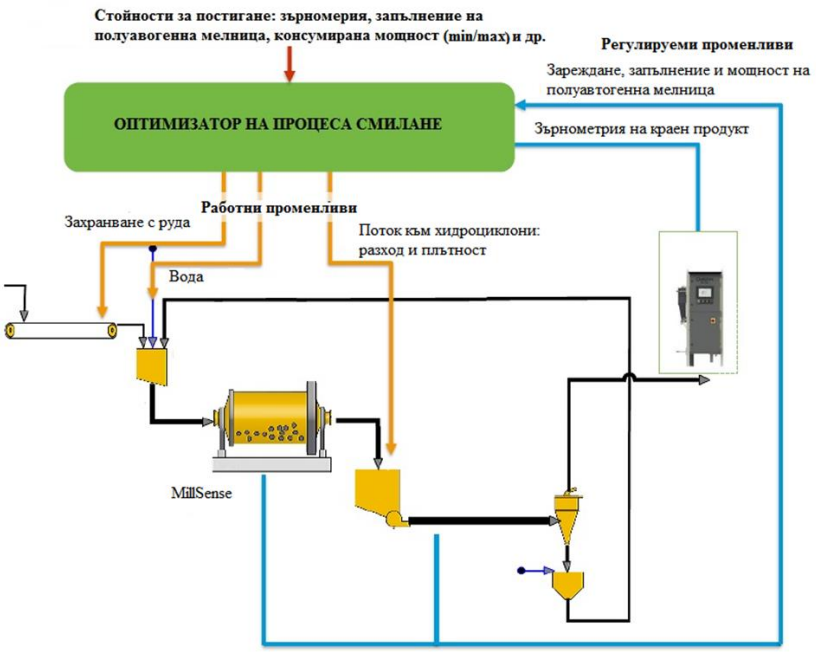
Адванс управление на процесите (APC) е популярна тема. Как може човек решава дали да се добави разширен контрол към съществуващ система? Разширеното управление се използва за подобряване на производителността, стабилизиране на производството, справяне с ограниченията, защита на оборудването и управлявайте промените в оценките. Повечето инсталации използват контролери за обратна връзка, обикновено PID(пропорционални, интегрални, производни) контролери. Обичайно е за разработване на специални схеми за управление за по-сложни процеси.

При класическото PID управление на процеса, контролерът носи единична стойност, близка до зададена точка, като се използва една манипулирана променлива. От друга страна, APC носи няколко стойности, близки до оптималните цели едновременно с помощта на няколко манипулирани променливи. Четирите основни стратегии на APC са усъвършенстваният регулаторен контрол, моделен предсказващ контрол (MPC), размита логика и невронал мрежи.

3. 7. АСР Решения в Grinding Optimizer

Процесът смилане с полуавтогенна мелница (SAG). на медна руда в Челопеч е много променлив и силно нелинеен. Преди внедряване на системата, контурите за управление на процесите бяха основно с ПИД регулатори, които управляваха отделни канали за управление в съответния процес. Недостатъкът е, че без APC управлението няма връзка между ПИД регулаторите на

различните процеси и операторите бяха активно ангажирани с манипулиране на много променливи с различна степен на успех, в зависимост от опита на оператора и смущенията в процесите. Опитни оператори могат да контролират процеса сдобри резултати, но представянето варира от един отбор на друг. Ненормалните ситуации са трудни за справяне, а консумацията на електроенергия е висока. Избрано е управление с оптимизаторът работи върху съществуващата система за управление на процесите (PCS) и предоставя нови отдалечени зададени стойности за вече съществуващи контролери в PCS (Фиг. 3.12.).



Фиг. 3. 12. Основна структура на Оптимизатора на смилане в Челопеч

Metso Outotec Grinding Optimizer се основава на моделно предсказващо управление (MPC),където поведението на процеса първо се моделира и след това се контролира според прогнози, базирани на тези модели. В сравнение с обикновените контролери на автоматизираната система, които контролират единични стойности използвайки един задвижващ механизъм, MPC оптимизаторът е многопроменлив контролер. То счита няколко променливи и различните взаимодействия, които те могат да имат помежду си, всички при по същото време. Това се прави автоматично от оптимизатора; нуждите на оператора да зададете определени цели и граници. Докато контролерите в PCS обикновено работят с бързи цикли и се опитват да се затворят пропуските между зададените и действителните стойности на процеса бързо, оптимизаторът работи на по-ниска честота, обикновено веднъж в минута. В допълнение към текущия процес стойности, той също така взема предвид прогнозираното състояние на процеса до часове в бъдещето когато решавате следващия контролен ход.

Изводи

В тази глава е разгледана полуавтогенна мелница като обект за автоматизация при различни канали за управление. Описани са различни методи, средства за автоматично управление на смилателни процеси с ПИД регулатор, типове регулатори, закони за регулиране и методи за управление с Адванс контрол за управление (APC). По тези методи за автоматично управление ще бъде изчислени оптимални настройки на ПИД регулаторите, ще бъдат идентифицирани модели за управление с Оптимизатор за смилане(ACT) на процеса смилане и ще бъде изследвана енергийната ефективност при различни методи, средства за автоматично управление на смилателни процеси.

Глава 4.ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОБОРУДВАНЕ

Смилането на рудни и изкопаеми е скъп и сложен процес. За изследвания в практиката е необходимо да се прекъсне или наруши производственият цикъл на предприятия, работещи по план и стриктно спазващи график. Поради тази причина е нецелесъобразно да се прекъсва производствения процес и да се правят изследвания със съществуващото оборудване в практиката.

Това налага използването на експериментално оборудване, методи и средства за изследване на работния процес на мелниците, предвиждания и контрол на изходния продукт в едно производство. За тази цел е разгледано оборудване и софтуер, които имат за цел да подпомогнат качеството, енергийната ефективност, оптимизацията и нежелани ремонти при процеса като цяло.

Разгледаните уреди и системи са:

1. Система Millcont осигуряваща измерване на ударни импулси генерирани от ударите на рудата в облицовката на полуавтогенната мелница.
2. Система MillSense осигуряваща онлайн измерване на ъгъла на падане на рудата в полу-автогенна мелница;
3. Софтуер за анализ на данни Matlab;
4. Диалогова програма за симулиране на работата и ефективността на регулатори за автоматично управление на процеси полуавтогенни мелници;
5. Система за енергиен мениджмънт и мониторинг PowerLogic.
6. Оптимизатор на процеса смилане (ACP);

Изводи

Експерименталното оборудване е хардуерно, софтуер, получаващ данни от полево оборудване и софтуер за симулация. Millcont 2A е хардуерно оборудване, което, който е усъвършенстван за двуконтурен микропроцесорният модул. Millsense, Logic Power и Оптимизатора на процеса смилане(ACT) получават информация от полево оборудване, обработват и я изпращат като управляващо въздействие към процеса смилане. Диалоговата програма симулира процеси по предварително изчислени данни.

Изполването на експерименталното оборудване допринася за по-точни изследвания, анализ, оптимизация и контрол на качеството и енергийната ефективност при мелещи процеси.

Глава 5. ПРОГРАМА ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ИЗСЛЕДВАНИЯ

Разработването на методики е изключително важно за провеждане на изследвания. По този начин ще бъде обърнато внимание на редица фактори влияещи при различните изследвания.

5. 1. Разработване на методика за определяне влиянието на ъгъла на падане на рудата и процентното запълнение на руда в полуавтогенната мелница

5. 2. Разработване на методика за изследване на влиянието на разтоварните решетки с различни размери на отворите в на полуавтогенната мелница към консумираната енергия при процеса смилане.

5. 3. Съставяне на методика за определяне на типа регулатор за автоматично управление на процеса смилане в полуавтогенната мелница.

5. 4. Разработване на методика за симулиране на автоматично управление на процеса смилане с ПИД регулатори влиянието върху енергийната ефективност на полуавтогенната мелница.

5.5. Разработване на методика за определяне на влиянието на автоматичният режим на работа на процеса смилане на върху енергийната ефективност.

5. 6. Разработване на методика за определяне на влиянието на Оптимизатора смилане(АСТ) в полуавтогенната мелница върху енергийната ефективност на процеса.

Извод

Следването на разработените методики за провеждането на и експерименти свързани с изследване на консумираната енергия при процеса смилане в полуавтогенната мелница допринася за получаването на бързи и достоверни резултати, при измерването на входно изходните данни. Също могат да се отчитат и сравняват резултатите, получени от различни симулации с подобен характер.

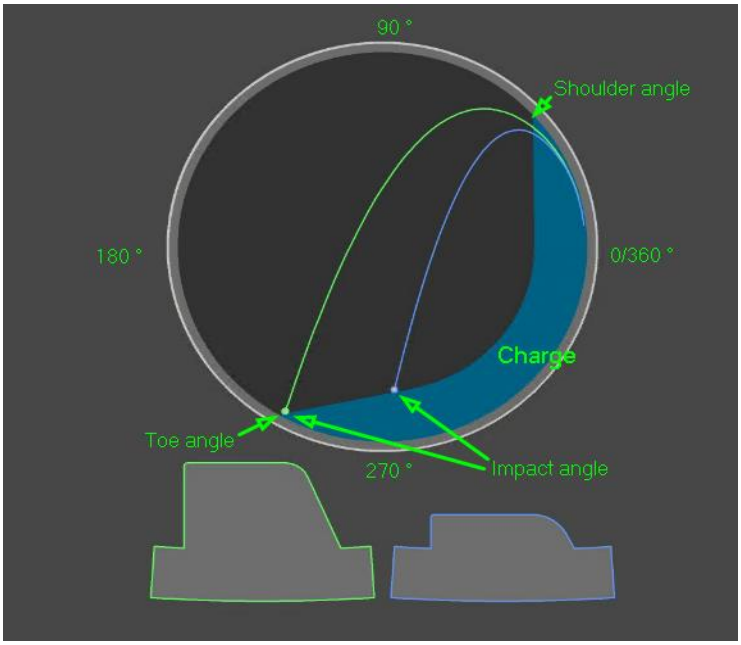
Глава 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ И РЕЗУЛТАТИ

6. 1. Технологични фактори влияещи върху енергийната ефективност при процеса смилане.

6. 1. 1. Изследване на влиянието на ъгъла на падане на рудата и процентното запълнение на руда в полуавтогенната мелница и зависимост на преработената руда от полуавтогенната мелница към консумираната енергия, чрез системата Millsense.

6. 1. 1. 1. Провеждане на експеримента и събиране на данни

Данните, необходими за настоящето изследване, са получени от система за мониторинг и събиране на данни PI. Те обхващат периода от 13. 10. 2020 от 10:20ч до 12:20ч до 24. 07. 2020г. Измерените параметри са показани схематично на (Фиг. 1).



Фиг. 6. 1. Схема на разпределението на товара в полуавтогенната мелница

Експериментът е направен при три режима на работа: нормален режим на работа с тегло на рудата в полуавтогенната мелница по технологична карта - 85÷86т, разтоварена - 78т и претоварена 90т, отчетено по товарна клетка. По време на експеримента скоростта на въртене на електродвигателя задвижващ полуавтогенната мелница е постоянна 867min-1.

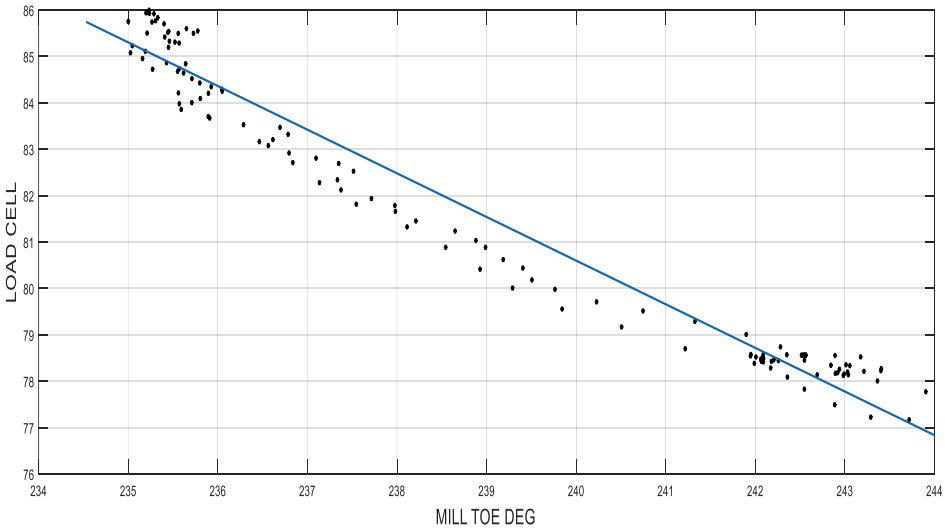
Получените резултати от измерванията са усреднени за една минута и част от тях са показани са в (Таблица 6. 1.) Всички данни могат да се видят в (Приложение 1.). В първата колона на таблицата е отразен денят и часът, за който са усреднени измерените величини, във втората колона е записана стойността на ъгъла на падане на рудата (опашка). В следващите колони са записани: запълването на мелницата в проценти, ъгъла на падане на рудата в мелницата, товарна клетка, средночасовите стойности на мощността на електродвигателя и количеството постъпваща руда в мелницата [22].

Таблица 6. 1.

Дата	Запълване на мелницата,%	Ъгъл на падане, deg	Скорост на въртене на електродвигател, min-1	Товарна клетка, t	Консумирана мощност, kW	Захранваща руда към мелницата, t	Производителност, KW/t
13-окт-20 10:20:00	27,6	235,45	870,485	85,54	3442,64	296,03159	11,62930
13-окт-20 10:21:00	27,6	235,44	868,252	85,52	3446,83	297,5556	11,58380
13-окт-20 10:22:00	27,6	235,56	868,334	85,50	3449,97	313,2688	11,01282
13-окт-20 10:23:00	27,4	235,73	867,086	85,50	3482,30	325,3123	10,70447
13-окт-20 10:24:00	27,4	235,78	866,039	85,55	3496,74	323,1288	10,82151
13-окт-20 10:25:00	27,5	235,65	866,564	85,60	3507,75	322,2130	10,88641865

6. 1. 1. 2. Анализ на получените резултати

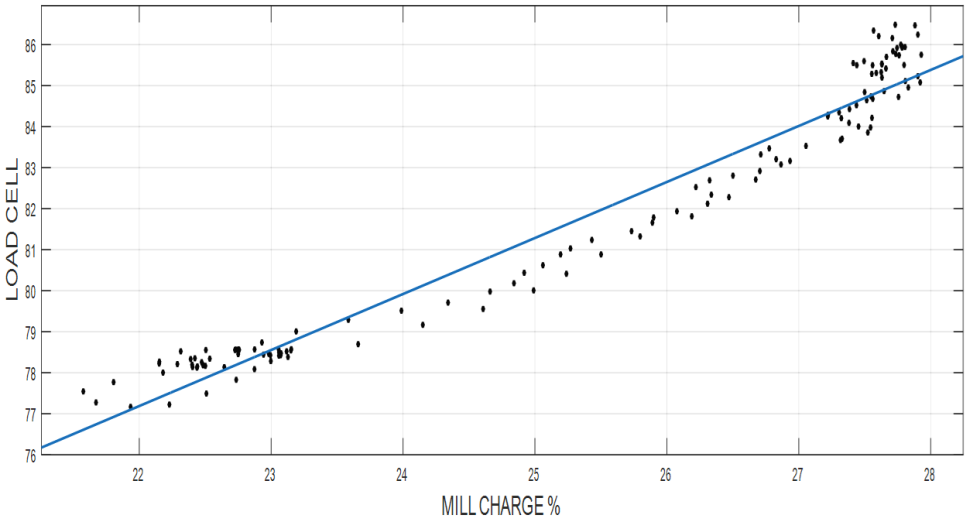
Анализът от получените резултати дава възможност за изследване, като се използва полиномния модел за интерполация и количествено измерване на зависимост чрез коефициентите на корелация и детерминация интегрирани в програмната система MatLab на ъгъла на падане на рудата в мелницата, товарна клетка на мелницата при различно запълване в мелницата. След обработката на данните от софтуера (Фиг. 6. 2.), се наблюдава линейна зависимост между ъгъла на падане на рудата в мелницата, отчетено от системата MillSens, към теглото на рудата в мелницата отчетено, от товарната клетка. Коефициентът на корелация r на графиката е 0.95, което прави връзката много силна.



R-square: 0. 9556

Фиг. 6. 2. Зависимост между между ъгъла на падане на рудата към теглото на рудата в мелницата

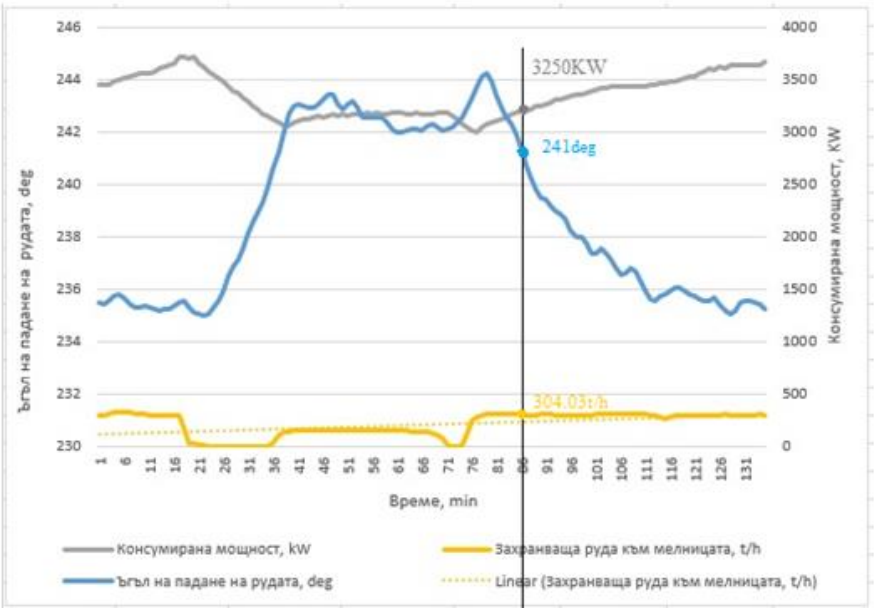
От графиката (Фиг. 6. 3.), се вижда, че има силна зависимост между процентното запълване с руда в мелницата, отчетено от системата MillSens, към теглото и, отчетено от товарната клетка. Коефициентът на корелация r на графиката е 0.72.



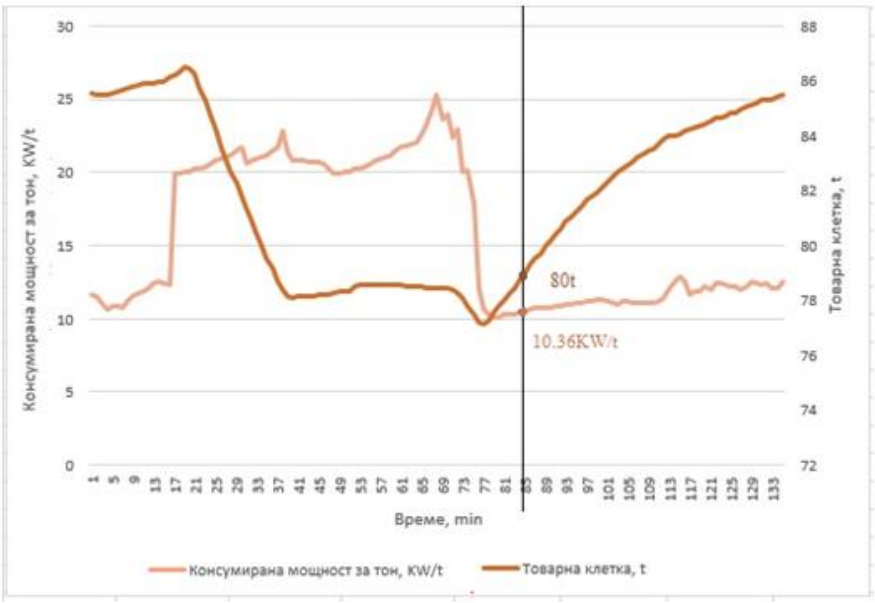
R-square: 0. 722

Фиг. 6. 3. Зависимост между процентото запълване към теглото на рудата в мелницата

Данните от визуализират консумацията на мощност от електродвигателя при различно захранване с руда при различни стойности на ъгъла на падане на рудата в полуавтогенната мелница(Фиг. 6. 4а.), отнесени към теглото и производителността и, която е консумирана мощност за преработена руда за тон (Фиг. 6. 4б.). При разтоварване на мелницата консумираната мощност за тон преработена руда се увеличава. С увеличаване на натоварване на мелницата с руда, което отчитаме с теглото на товарната клетка производителността се започва да намалява. Най-енергоефективен е процесът смилане, когато ъгълът на падане е 240º -241º, тогава консумираната мощност за тон преработена руда е 10,36KW/t, при товарна клетка 80t.



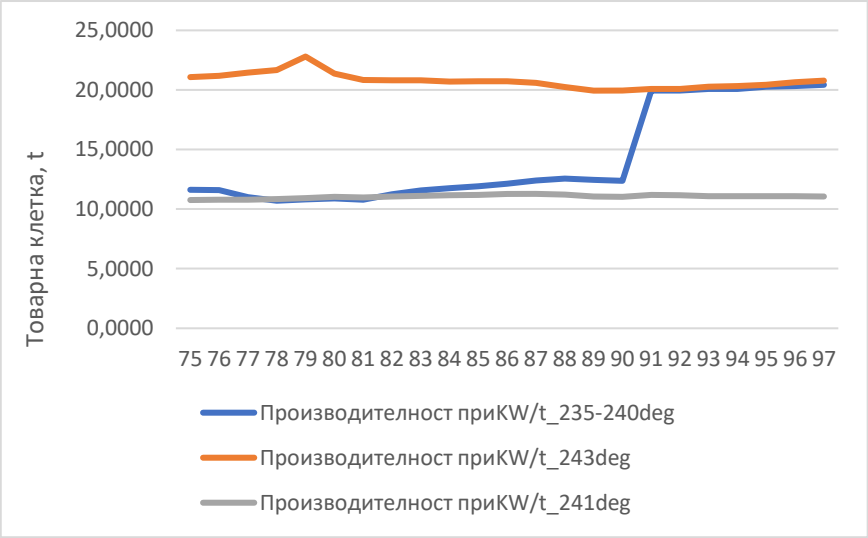
а) консумацията на мощност от електродвигателя при различно захранване с руда и ъгъл на падане на рудата



б) тегло и производителност на полуавтогенната мелница

Фиг. 6. 4. Графика на консумираната мощност, ъгъла на падане на рудата и захранване с руда на мелницата

На (Фиг. 6. 5.) са показана производителността на полуавтогената мелница три различни ъгъла на падане на рудата, както видно от графиката консумацията за тон преработена руда е най-ниска.



Фиг. 6. 5. Графика на производителността на процеса смилане при различни различни ъгъла на падане на рудата

Изводи

1. В направения експериментът е изследвана производителността на полуавтогенната мелница при три режима на работа: разтоварена, нормален, претоварена режим на работа при постоянна скорост на въртене на електродвигателя задвижващт полуавтогенната мелница.

2. При разтоварване на мелницата производителността при процеса смилане намалява т. е специфичния разход на енергия за тон преработена руда се увеличава.

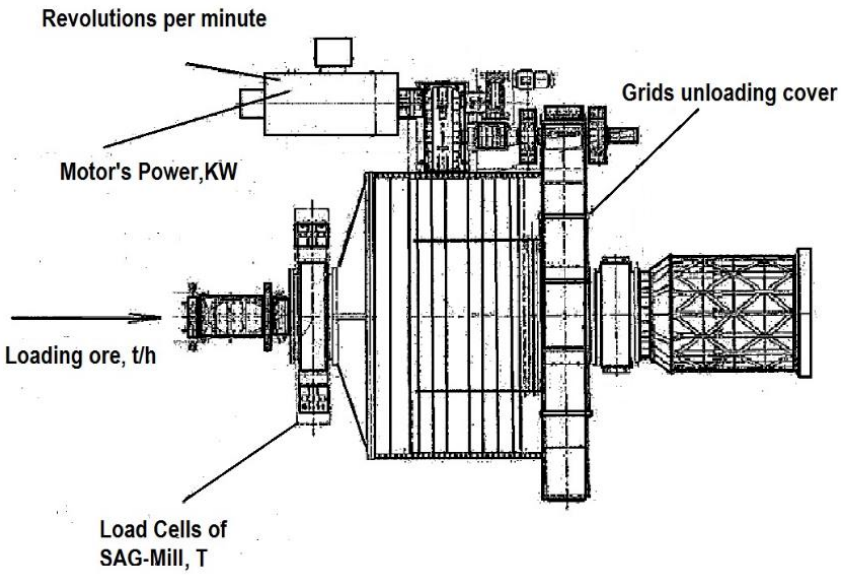
3. Най-ефективен е процесът смилане по отношение на изразходена енергия е, когато ъгълът на падане е 240º -241º. Тогава при товарна клетка от 80t [22] специфичният разход на електроенергия е 10,36KWh/t.

6. 2. Конструктивни фактори влияещи върху енергийната ефективност при процеса смилане.

6. 2. 1. Изследване на влиянието на разтоварните решетки с различни размери на отворите в полуавтогенната мелница към консумираната енергия при процеса смилане.

6. 2. 1. 1. Провеждане на експеримента и събиране на данни

Данните необходими за настоящето изследване са получени от система за мониторинг и събиране на данни *PI.* Те обхващат периода от 11. 12. 2019г до 24. 07. 2020г. Измерените параметри са показани схематично на (Фиг. 6.6.).



Фиг. 6. 6. Схема на полуавтогеннамелница[100]

6. 2. 1. 2. Резултати от проведени измервания на параметри влияещи върху мощноста на електродвигателя

Таблица 6. 2.

Дата	Консумирана мощност на електродвигателя, kW	Обороти на електродвигателя/min-1	Товарна клетка на ПАМ /Т	Захранване на руда с ПАМ /Т
15. 12. 2019	4447,29	999,35	92,43	156,31
15. 12. 2019	4424,84	999,68	92,71	155,76
15. 12. 2019	4488,91	999,22	93,37	154,27
15. 12. 2019	4509,39	999,70	92,71	223,99
15. 12. 2019	4540,50	999,52	93,24	234,56
15. 12. 2019	4652,13	998,75	94,38	231,69

Таблица 6. 3.

Дата	Консумирана мощност на електродвигателя, kW	Обороти на електродвигателя/min-1	Товарана клетка на ПАМ /Т	Захранване на мелницата с руда /Т
10. 4. 2020	5221,36	1013,42	82,06	177,26
10. 4. 2020	4916,69	1010,32	81,86	182,21
10. 4. 2020	3950,32	904,66	78,88	219,56
10. 4. 2020	4943,91	943,11	84,52	240,47
10. 4. 2020	5255,97	1013,73	84,34	257,06
10. 4. 2020	5245,60	1013,59	83,81	268,72

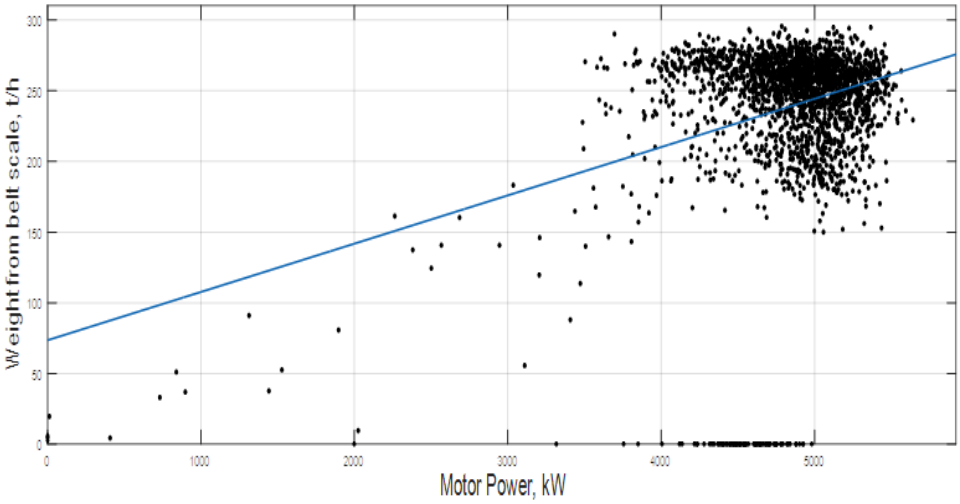
Част от получените резултати от измерванията са осреднени за един час и са показани в Таблица 6. 2., като обхващат всеки ден от периода: поставяне на нова облицовка на цилиндъра и решетки с размер на отворите X=23mm на 11. 12. 2019г. до 29. 03. 2020г. и от периода: работа с решетки на разтоварващият капак с размер на отворите X=25mm и поставяне на нова облицовка на цилиндъра на 03. 05. 2020 до 24. 07. 2020г. (Таблица 6. 3.). Всички данни могат да се видят в (Приложение 2).

В първата колона на таблицата е отразен денят на измерването втората часът, за който са осреднени измерените величини, в третата колона е записана средначасовите стойности на мощноста на електродвигателя. В следващите колони са записани средночасовите стойности на обороти на електродвигателя, товарна клетка на мелницата и количеството постъпваща руда[21].

6. 2. 1. 3. Анализ на получените резултати

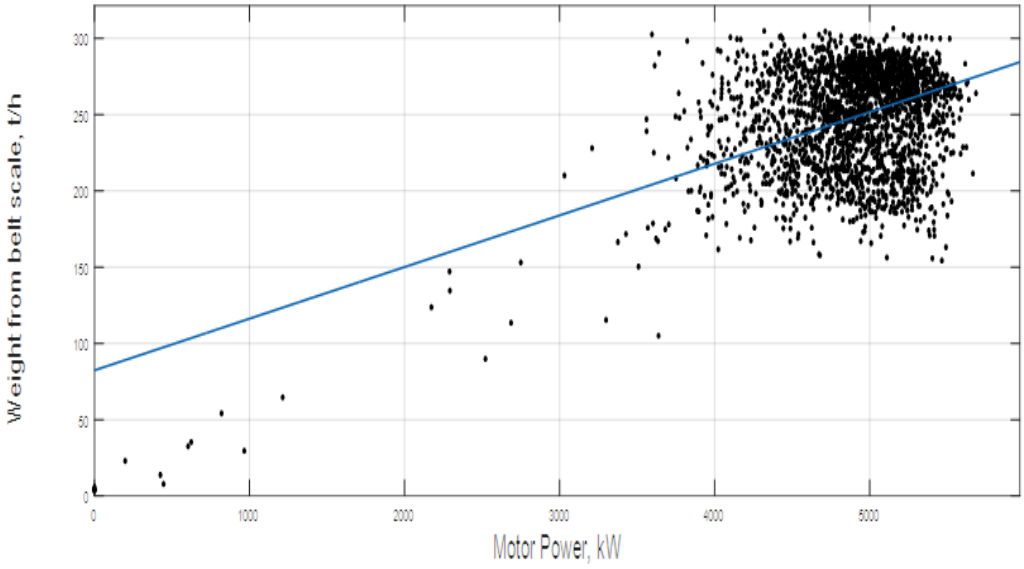
Анализа от получените резултат дават възможност за изследване на мощността на електродвигателя, като се използва полиномния модел за интерполация и количествено измерване на зависимост чрез коефициентите на корелация и детерминация на измерената мощност на електродвигателя към производителността на мелницата по количеството постъпваща руда за еденица време, обороти на електродвигателя, товарна клетка на мелницата при работа на мелницата с два различни размера на решетките на разтоварващият капак.

След обработката на входно – изходните данни от софтуера, показани на (Фиг. 6. 7а и 6. 7б) при работа на мелницата с решетки с отвори 25мм се наблюдава по-ниска консумация на мощност за преработване на количеството постъпваща руда за единица време. При работа на мелницата с решетки с отвори 23мм използваната енергия е по-висока, тъй като пропускливостта решетките е по-малка и мелницата работи с по- голямо запълване. Коефициента на корелация r при двете графики е 0. 3÷0. 5, което прави връзката умерена.



R-square: 0. 09502

а) връзка с размери на отвори на решетките 23мм

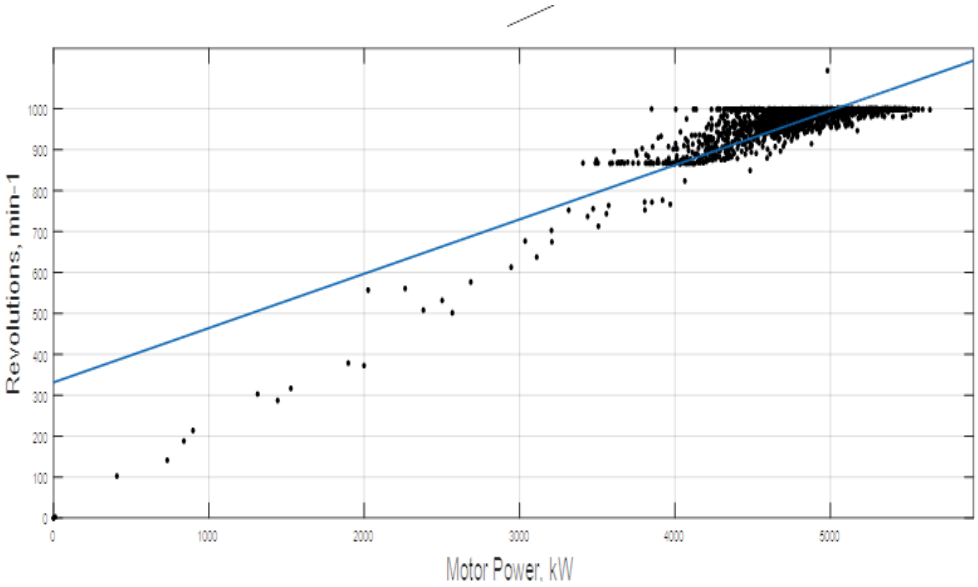


R-square: 0. 2533

б) връзка с размери на отвори на решетките 25мм

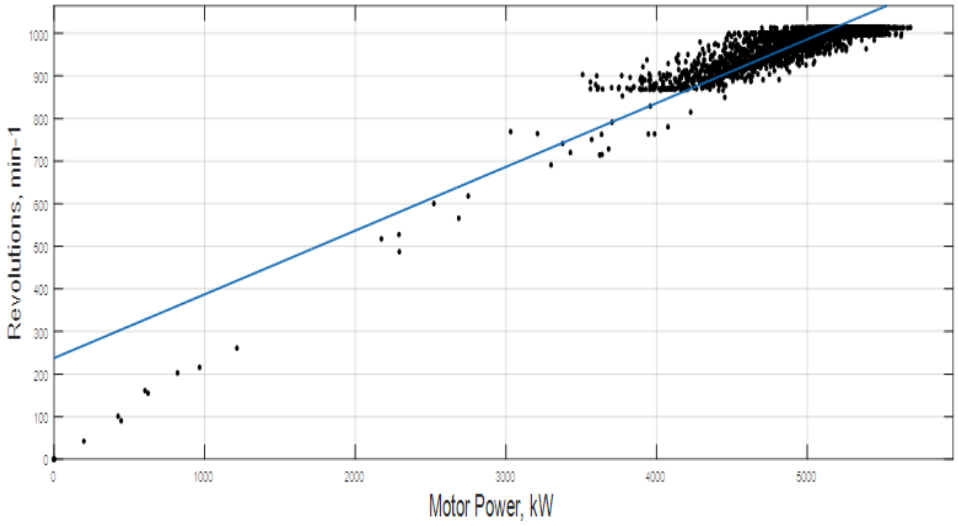
Фиг. 6.7. Връзки между измерената мощност на електродвигателя и количеството постъпваща руда в мелницата за единица време

На (Фиг. 6. 8а и 6. 8б) са показани връзките между мощноста и оборотите на електродвигателя. Наблюдава се еднаква консумация на мощност при едни и обороти на електродвигателя при различните отвори на решетките. Това се дължи на автоматичното управление на оборотите на електродвигателя от товарната клетка на мелницата. Коефициента на корелация r при двете графики е 0. 7÷0. 9, което прави връзката силна.



R-square: 0. 754

а)връзка с размери на отвори на решетките 23мм

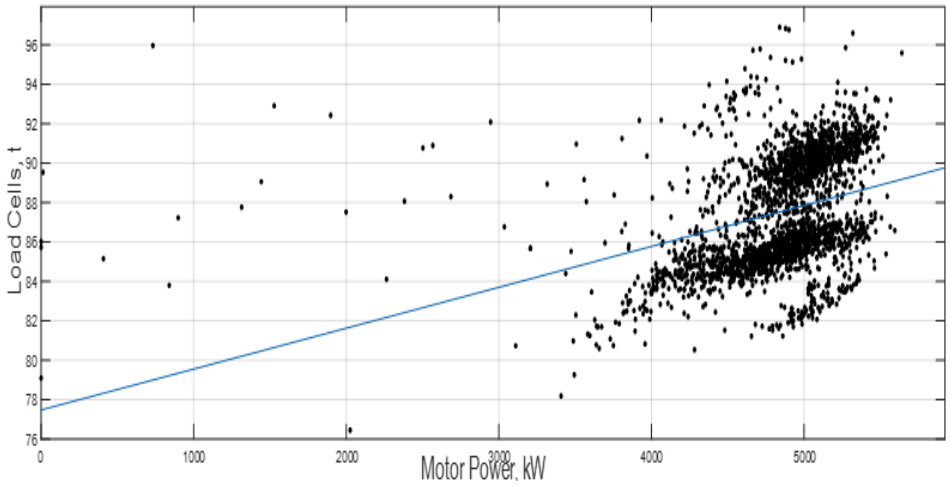


R-square: 0. 843

б) връзка с размери на отвори на решетките 25мм

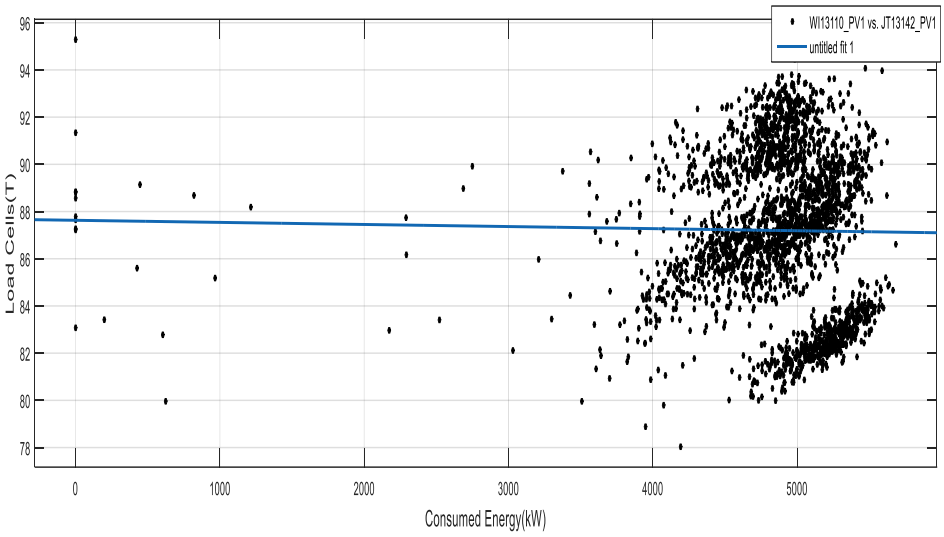
Фиг. 6. 8. Връзки между измерената мощност и оборотите на електродвигателя

От графиката показана на (Фиг. 6. 9б) се вижда, че няма корелация между консумираната мощност на електродвигателя и товарна клетка при работа на мелницата с разтоварни решетки 25мм. Връзката между мощноста на електродвигателя на мелница за смилане на рудата с разтоварни решетки с отвори 23мм е линейна. С увеличаване на товарната клетка се увеличава консумираната мощност. Най-оптималното тегло на товарната клетка е 92-94т. Коефициента на корелация на графика (Фиг. 6. 9а) е r=0. 34, което прави връзката слаба.



R-square: 0. 1205

а) връзка с размери на отвори на решетките 23мм

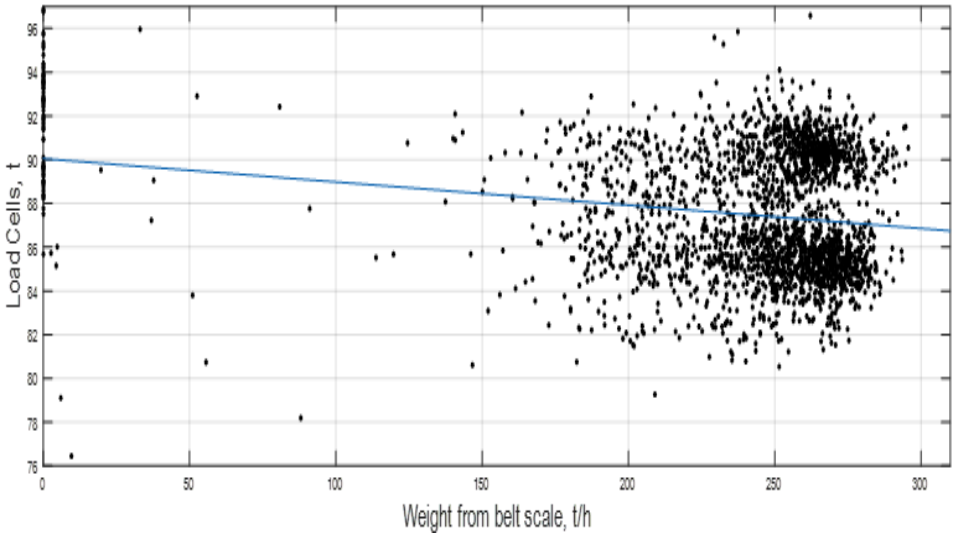


R-square: 0. 0002272

б) връзка с размери на отвори на решетките 25мм

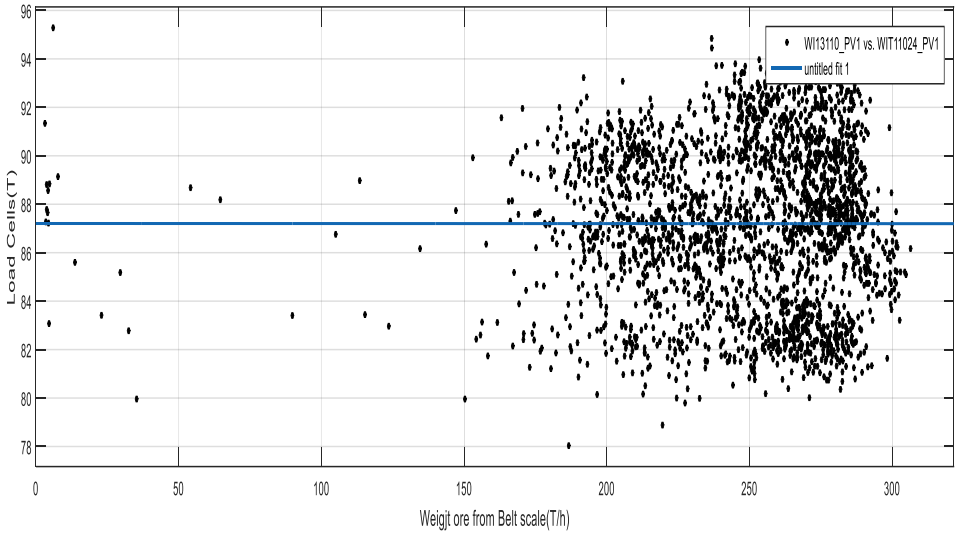
Фиг. 6. 9. Връзки между измерената мощност на електродвигателя и товарна клетка на мелницата

Връзката между резултатите от измерванията (Фиг. 6. 10а) е слаба. Връзката с размери на отвори на решетките 25мм (Фиг. 6.10б), r=-2. 53e-04, което я прави с обратна и с много слаба зависимост. Причината е по големите отвори на решетките на разтоварващият капак на мелницата, което води до намаляване на времето на преминаването на рудата в мелницата.



R-square: 0. 03895

а) връзка с размери на отвори на решетките 23мм



R-square: 6. 419e-08

б) връзка с размери на отвори на решетките 25мм

Фиг. 6. 10. Връзки между измереното количеството постъпваща руда в мелницата и товарната клетка

Изводи

В заключение могат да бъдат направени следните изводи към изследването:

1. Наблюдава се по-нисък на разход за преработване на количество постъпваща руда за единица време при работа на мелницата с решетки с отвори 25мм в сравнение с решетките с размер на отворите 23мм, сравнявайки двата отчетени периода. Това е в следствие по-бързото преминаване на рудата през разтоварващия капак, което позволява по-високата продуктивност.
2. При по-големите отвори на решетките не се наблюдава връзка между мощността на електродвигателя и товарната клетка на мелницата. При решетките с отвори 23мм виждаме много слаба връзката, но въпреки това дава възможност да се използват корелационна връзка.
3. Не се наблюдава връзка между постъпващата руда в и товарната клетка на мелницата и при двата типа решетки.
4. Най-рентабилна работа на мелницата по отношение на консумираната мощност при смилане на рудата е задаване на тегло над 90т, отчетено от товарната клетка на мелницата. Това се наблюдава при работа на мелницата с двата типа решетки на разтоварващият капак [21].

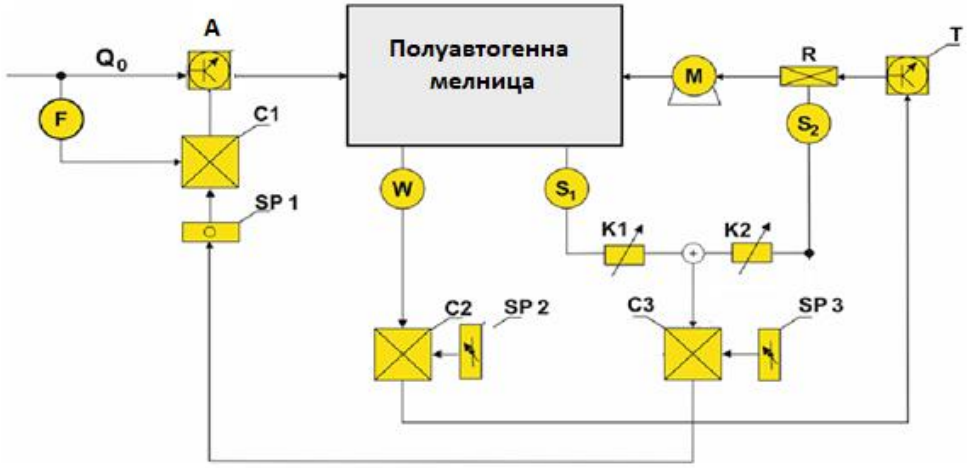
6.3 . Автоматизирани системи влияещи върху енергийната ефективност при процеса смилане.

Избрана е следната информционно – управляваща структура на системата за натоварването с руда на полуавтогенната мелница (Фиг. 6.11.) и съответните контури за управление.

1. Контур за стабилизация на захранващата руда, съдържащ съдържащ лентова везна F, регулатор C1 със задатчик SP1 и честотен преопразувател A, въздействащ на скоростта на ГТЛ.
2. Контур за управление натоврването на мелницата, съдържащ теглоизмерителната клетка W, регулатор C2 със задатчик SP2 и честотен преопразувател T, въздействащ чрез редуктора R за изменение на оборотите на задвижващия мелницата високоволтов двигател M.
3. Новоизграден е контури въздействащ на скоростта на ГТЛ за изменение на оборотите на захранващата лентата на заданието на захранващата руда, съдържащ дистанционния датчик за натоварване на мелницата S1 и директния датчик S2, които чрез тегловните коефициенти K1 и K2

подават сумарен сигнал на входа на регулатора С3, въздействащ върху автоматичния задатчик SP1 на първия контур С1.

Този контур е изграден на базата на разработените нови технически средства: дистанционен SRIP и директен SDIP датчици за измерване на ударни импулси и новия двуконтурен микропроцесорен управляващ модул MILLCONT 2A.



Фиг. 6. 11. Контури за управление на процеса смилане

6. 3. 1. Определяне на типа на регулатори и закони за регулиране при управление на процеса смилане в контура за натоварването на полуавтогенна мелницата, съдържащ теглоизмерителната клетка W.

6. 3. 1. 1. Провеждане на експеримента и събиране на данни

Данните необходими за настоящето изследване са получени от система за мониторинг и събиране на данни PI. Те обхващат периода от 18. 10. 2021г. 10:21:00ч. до 18. 10. 2021г. 12:29:00ч. Част от измерените параметри са показани в (Таблица6. 4.). Всички данни могат да се видят в (Приложение 3.).

Таблица 6. 4.

Дата	Консумация на електродвигател,kW,	Товарна клетка на ПАМ, Т	Вибрации на редуктора задвижващ полуавтогенната мелница,%	Захранване с руда на полуавтогенна мелница от лентова везна, t/h
18. 10. 2021				
18-окт-21 10:21:00	4418,363894	90,37125049	82,53038025	150,7233949
18-окт-21 10:22:00	4460,286046	90,42266804	82,53038025	68,56871851
18-окт-21 10:23:00	4473,680639	90,37801314	82,53038025	24,03924108
18-окт-21 10:24:00	4390,056259	90,13935676	82,53038025	7,453276567
18-окт-21 10:25:00	4308,175862	89,58467902	82,53038025	3,948358105
18-окт-21 10:26:00	4241,981609	88,99329064	82,53038025	3,671208631

6. 3. 1. 2. Експериментално снемане на преходни характеристики при увеличаване и намаляване на рудата по контур за управление натоврването на мелницата, съдържащ теглоизмерителната клетка

За опеределяне на типа регулатор и съответните настройки се снема преходна харектеристика при натоварване и разтоварване на полу-автогенна мелница (Фиг. 6. 12.).

Установява и се стабилизира избрания режим на работа на мелницата. Ръчно и с помощта на дозиращата лентова везна и изпълнителния механизъм на водата се подават няколко кратковременни въздействия с избраната форма и се записват входното въздействие и реакциите на сигналите от датчиците.

Фиг. 6. 12. Графика при натоварване и разтоварване на полуавтогенна мелница

Преходният процес се смята за приключил, когато времето, изходната величина Y практически не се изменя. Наблюдава се внимателно, за да не надхвърли допустимата стойност. Въздействията се подават с нарастваща амплитуда и с различен знак на амплитудата [16].

По този начин може да се определи в какви граници обекта остава линеен. При линеен обект е валиден принципа на суперпозицията. Това означава, че отношението

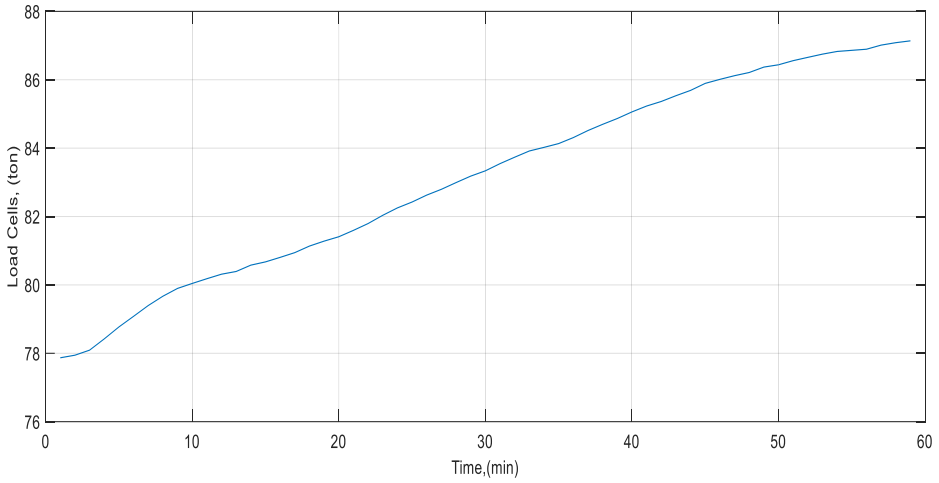
$$K = \frac{y(t_{УСТ})}{x}$$

трябва да остане приблизително постоянно при различните знаци и стойности на. Когато стойностите се различават повече от 15%, означава, че сме навлезли в нелинейната зона на обекта. Тази проверка е приблизителна.

6. 3. 1. 2. 1. Построяване на преходната характеристика при увеличаване на рудата

За решаването на задачата е необходимо първо построяването на преходната характеристика и в следствие на това да бъде направено нейното изглаждане. В Matlab средата се въвеждат следните данни:

```
t = [ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58
59 ]
y = [ 77. 868310799282 77. 9442629477196 78. 0919082597148 78. 4211018795265 78.
7704800932623 79. 0810727159868 79. 3962768581129 79. 6690247480169 79. 8975999908214
80. 0423798305597 80. 1811278843158 80. 3133457410279 80.]
plot(t,y)
grid on
```



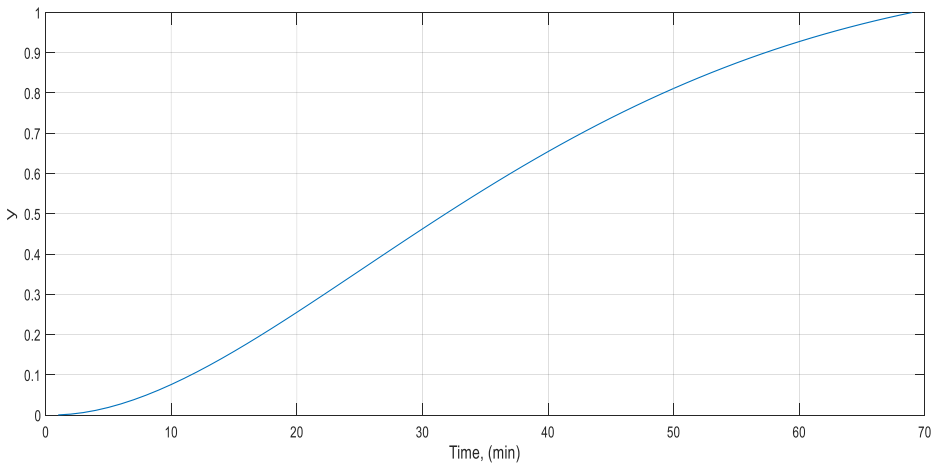
Фиг. 6. 13. Преходна характеристика при увеличаване на рудата

6. 3. 1. 2. 2. Апроксимация на експериментално снети преходни характеристики по метод на Орманс при увеличаване на рудата.

За целите на моделирането на системи за автоматично регулиране (САР) е необходимо статичните и динамичните свойства на обектите да се изразят в аналитичен вид т. е. във вид на диференциални уравнения, предавателни функции или амплитудно-фазови характеристики.

Експерименталните преходни характеристики на сложните обекти са решения на диференциални уравнения от висок ред. Намирането на точните уравнения най-често нито е възможно, нито е необходимо. Ето защо те се заменят с по-прости уравнения, които удовлетворяват изискванията. Такава замяна на опитно получена крива с приближен аналитичен израз се нарича *апроксимация.* В средата MatLab се реализира апроксимация с помощта на следния синтаксис:

```
t=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58
59 60 61 62 63 64 65 66 ]
y=[90. 3712504938958 90. 4226680437108 90. 3780131367107 90. 139356756542 89.
5846790155403 88. 9932906385534 88. 3815136592666 87. 810930145842 87. 2811376101175
86. 7523129964815 86. 2505294482639 85. 8072697515437 85. ]
plot(t,y)
grid on
y=66
yn=yf/66
plot(t,yn)
grid on
```



Фиг. 6. 14. Нормализирана преходна характеристика при увеличаване на рудата

6. 3. 1. 2. 3. Метод Орманс за определяне настройка на регулатори в едноконтурни САР по данни от експериментално снета преходна характеристика

Метода на Орманс дава възможност да се апроксимира по следните типове динамични звена[27]:

$W_{0(p)} = \frac{k_o.e^{-pt_o}}{T_o p+1}$; апериодично звено от I ред с чисто закъснение;

Апроксимацията на преходна характеристика по метод на Орманс при увеличаване на рудата се извършва по следния начин:

от преходната характеристика за $\bar{h}_7 = 0.7$ се отчита времето t_7, времето при което преходната характеристика е равна на 0. 7.

$t_7 = t'_7 = 47\min \Rightarrow 2820s$. Определя се времето $t_4 = t_{7/3}$ по него се отчита $\bar{h}_4$

$t_4 = \frac{t_7}{3} = \frac{2820}{3} = 940s$ $2T = \frac{t_7}{2} = \frac{2820}{2} = 1410s \Rightarrow t''_4 = 1410s$ $\bar{h}_4 = 0.11$

От стойността на $\bar{h}_4$ се разглеждат няколко варианта :

- Ако $\bar{h}_4 = 0.11 < 0.191$ преходния процес трябва да се апроксимира по следния начин:

$$W(p) = \frac{k_{ob} * e^{-p\tau}}{1 + 2*T*p + T^2*p^2}$$

- от нормализираната характеристика за $\bar{h}_7$=0. 7 и $\bar{h}_4$=0. 191 се отчитат времената t'_4 и t'_7. От тях се намират параметрите на обекта.

$t'_7 = 2820s$ и $t_4 = 0.11s$ $t''_4 = 1410s$

Времето на чистото закъснение τ се изчислява по формулата:

$$t_0 = 0.5*(3t''_4 - t_7) = 0.5*(3*1410 - 2820) = 0.5*1410 = 705,$$

а времеконстантата:

$$T_0 = \frac{t'_7 - t}{2.4} = \frac{2820-705}{2.4} = 881{,}25$$

$$W(p) = \frac{k_{ob} * e^{-p\tau}}{1 + 2*T*p + T^2*p^2} = \frac{2.6.e^{-36.03p}}{1 + 116.6p + 3398.89p^2}$$

- ако ħ4 > 0. 33 преходния процес трябва да се апроксимира по следния начин: От нормираната преходна характеристика се определят времената t7 и t'4, отчетени за ħ7 = 0. 7 и ħ4 =0. 33:

$t'_7 = 2820s$ и $t_4 = 0.11s$ $t'_4 = 1500s$

Времето на чистото закъснение τ се изчислява по формулата:

$$t_0 = 0.5*(3t'_4 - t_7) = 0.5*(3*1500 - 2820) = 0.5*1680 = 840,$$

а времеконстантата:

$$T_0 = \frac{t'_{7-t}}{1.2} = \frac{2820-840}{1.2} = 1650$$

$$K_0 = \frac{\Delta y[\%]}{\Delta x[\%]} = \frac{0,09}{0,375} = 0,24.$$

Канал за управление	Апроксимация	K_o, sec	τ_0, sec	T_o
W – Q_o	Точна $W_0(p) = \frac{k_o.e^{-pt_o}}{(T_o p+1)^2}$;	0,24	705	881,25

6. 3. 2. Избор на типа на регулаторите и закон за регулиране при увеличаване и намаляване на рудата в полуавтогенна мелница по данни от експериментално снета преходна характеристика

6. 3. 2. 1. Избор на закон за регулиране и типа на регулатор със съответните настройки при увеличаване на рудата по Метода на Орманс.

При избор на типа на регулатора се преоръчва следното:

- ако отношението $\tau_0 / T_0 \le 0.2$ се избира релеен регулатор;
- ако отношението $\tau_0 / T_0 > 0.2$ (1. 1) се препоръчва да се избере непрекъснат закон на регулиране, като настройката на ПИД регулатор при апериодичен преходен процес е следната:

$$K_0 = \frac{\Delta y[\%]}{\Delta x[\%]} = \frac{0,09}{0,375} = 0,24.$$

$$0,2 < \frac{\tau_0}{T_0} = \frac{705}{881.25} = 0.8s < 1$$

$$K_r = \frac{0,45.T_0}{\tau_0 . K_0} = \frac{0,45.881,25}{705.0,24} = 1,75,$$

$$T_i = 0,6.T_0 = 0,6.881,25 = 528,75,$$

$$T_D = 0,1.T_i = 0,1.528,75 = 52,87,$$

В случай на използване на цифров (микропроцесорен) регулатор се коригират така изчислените настройки по следния начин[132]:

$$K_r^* = \frac{K_r}{1,5} = \frac{1,75}{1,5} = 1,16$$

$$T_i^* = \frac{T_i}{1,5} = \frac{528,75}{1,5} = 352,5$$

$$T_D^* = \frac{T_D}{3} = \frac{52,87}{3} = 17,67$$

$$T_c = 0,1.\ \tau_0 = 0,1.\ 705 = 70,5$$

6. 3. 2. 3. Избор на закон за регулиране, типа на регулатор със съответните настройки при увеличаване на рудата по Метода на инфлексна точка

$$t_0 = t_{0,05},$$
$$t_0 = t_{0,05} = 8min = 480s$$
$$T_0 = t_{0,6} - t_0$$
$$t_{0,6} = 36min = 2160s$$
$$T_0 = t_{0,6} - t_0 = 2160 - 480 = 1680s$$
$$K_0 = \frac{\Delta y[\%]}{\Delta x[\%]} = \frac{0,09}{0,375} = 0,24,$$

от отношението $\tau_0 / T_0 > 0.2$ се избира регулатор с непрекъснато действие;

$$0,2 < \frac{\tau_0}{T_0} = \frac{480}{1680} = 0.28s < 1 \ (1.\ 2)$$

В този случай последователността на настройката на ПИД регулатор при апериодичен преходен процес е следната:

Изчислява се $$K_r = \frac{0,45.T_0}{\tau_0 .K_0} = \frac{0,45.1680}{480.0,24} = 6,56s \ (1.\ 3)$$

$$T_i = 0,6.T_0 = 0,6.1680 = 1008s \ (1.\ 4)$$

$$T_D = 0,1.T_i = 0,1.1008 = 100,8s \ (1.\ 5)$$

При използване на цифров (микропроцесорен) регулатор се коригират така изчислените настройки по следния начин:

$$K_r^* = \frac{K_r}{1,5} = \frac{6,56}{1,5} = 4,37 \ (1.\ 6)$$

$$T_i^* = \frac{T_i}{1,5} = \frac{1008}{1,5} = 672 \ (1.\ 7)$$
$$T_D^* = \frac{T_D}{3} = \frac{100,8}{3} = 33,6 \ (1.\ 8)$$

Определя се такта на управление

$$T_c = 0,1.\ \tau_0 = 0,1.\ 480 = 48 \ (1.\ 9)$$

При използване на цифров (микропроцесорен) регулатор се коригират така изчислените настройки по следния начин:

$$K_r^* = \frac{K_r}{1,5} = \frac{7,58}{1,5} = 5,05 \ (1.\ 14)$$
$$T_i^* = \frac{T_i}{1,5} = \frac{234}{1,5} = 156 \ (1.\ 15)$$

$$T_D^* = \frac{T_D}{3} = \frac{156}{3} = 52 \text{ (1. 16)}$$

Определя се такта на управление:

$$T_c = 0{,}1.\ \tau_0 = 0{,}1.\ 390 = 39 \text{ (1. 17)}$$

Таблица 6. 5.

Посока на действие на регулатора	Настройки на ПИД регулатора по метода на Орманс			
	P_r	T_i [s]	Td [s]	T_c
При увеличаване на рудата в ПАМ	1,16	352,5	17,67	70,5

Таблица 6. 6.

Посока на действие на регулатора	Настройки на ПИД регулатора по метода на Инфлексната тока			
	P_r	T_i [s]	Td [s]	T_c
При увеличаване на рудата в ПАМ	4,37	672	33,6	48

В контура за управление натоварването на мелницата се използва регулатор с аналогов изход. Съгласно данните за параметрите на обекта (Таблица 6. 5.), настойките на регулатора са по метода на Орманс при увеличаване и намаляване на рудата в полуавтогенната мелница. И съласно (Таблица 6. 6.) по метода на Инфлексната точка. Изходният сигнал от непрекъснатия регулатор коригира количеството на руда, подавана в полуавтогенната мелница, като регулатора управлява скоростта на двата дозатора, като се въздейства в границите на ±30% от номиналния количества руда[133].

Така реализираната система за управление на процеса мокро смилане в едностадийната мелница за руда осъществява стабилизиране на зададените изходни показатели (финост на смилане и плътност), с което се осигурява оптимална производителност на мелничния агрегат.

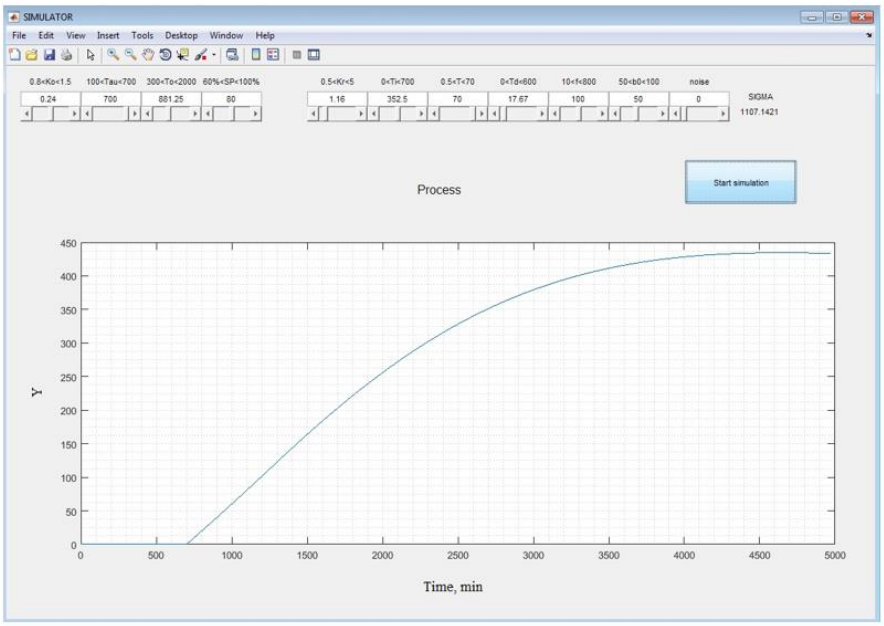
6. 3. 4. Симулиране на работата и ефективността на регулатори в контура за автоматично управление натоварването на полуавтогенната мелницата, съдържащ теглоизмерителната клетка

Пускането в действ и теста на регулаторите с различни настройки с свързано с много загуби при нарушаване на производственият процес. Поради тази причина за целите на симулирането на работата на регулатори системи за автоматично регулиране (САР) е написана програма в Matlab, с която може да се направи симулация [116, 126] на работата регглаторите и да се направи оценка на ефективността им.

6. 3. 4. 1. Симулиране на регулатор с настойки по метода на Орманс при увеличаване на рудата в полуавтогенна мелница

Изходният сигнал от непрекъснатия регулатор коригира количеството на руда, подавана в полуавтогенната мелница, като регулатора управлява скоростта на двата дозатора. На (Фиг. 6. 20.) се

вижда симулация на процеса при увеличаване на рудата в полуавтогенната мелница с настройки на регулатора по метода на Орманс.



Фиг. 6. 20. Графика на преходен процес при натоварване на мелницата по Метода на Орманс.

Процеса е апериодичен, но с голямо време на затихване на преходният процес. Изчислената стойност на σ (SIGMA) е 1107. 14, която е идентификатор за работата на избраният регулатор. Колкото са по по-ниски, регулаторът е по-ефективен.

Полетата в симулатора за симулация на преходна характеристика след изчисляването на настройките на регулатора са[17,18]:

K_0 - Отншението $\Delta y[\%]$ към то $\Delta x[\%]$ в проценти,

Tau - Времето на чистото закъснение,

T_0 - Времеконстанта,

SP - Задание в проценти,

K_r - Изчислената K_r^* на регулатора за цифров регулатор,

T_i - Изчислената T_i^* на регулатора за цифров регулатор,

T - такт на управление,

T_d - Изчислената T_d^* на регулатора за цифров регулатор,

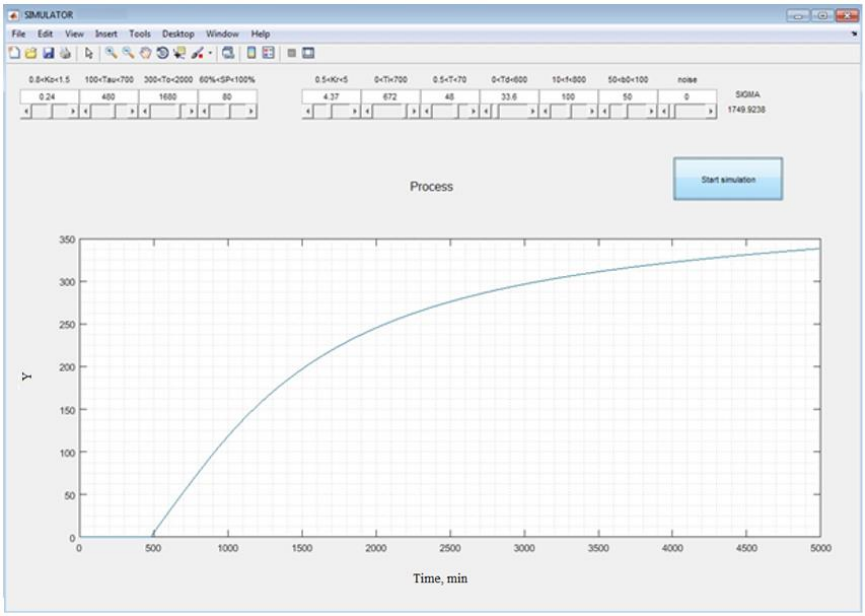
f - Обхват на изходния сигнал на цифровия регулатор,

b0 - Начална стойност на регулатора, от която изпълнителният механизъм започва да регулира,

nois- задава се след, като тръгне процеса.

6. 3. 4. 3. Симулиране на регулатор с настойки по Метода на инфлексна точка при увеличаване на рудата в полуавтогенна мелница.

На (Фиг. 6. 22.) се вижда симулация на процеса при увеличаване на рудата в полуавтогенната мелница с настройки на регулатора по Метода на инфлексна точка. Процеса е апериодичен, а времето на затихване на преходният процес е по голям от преходният процес в следствие на настройки на регулатора по метода на Орманс. Изчислената стойност на SIGMA е 1749. 92.



Фиг. 6. 22. Графика на преходен процес при натоварване на мелницата по Метода на инфлексна точка.

Таблица 6. 10.

Настройки на регулатор по:	Захранване с руда	Контур	SIGMA
Метод на Орманс	Увеличава	W– Q_0	1107. 14
	Намалява	W– Q_0	1475. 01
Метод на инфлексната точка	Увеличава	W– Q_0	1749. 42
	Намалява	W– Q_0	595. 36
Метод на Орманс	Увеличава	S_2 – Q_0	NaN
	Намалява	S_2 – Q_0	1467. 04
Метод на инфлексната точка	Увеличава	S_2 – Q_0	1722. 18
	Намалява	S_2 – Q_0	1468. 91

Изводи

За опеределяне на типа регулатор и съответните настройки се извърши пасивен експеримент за снемане преходна характеристика при натоварване и разтоварване на полу-автогенна мелница, като се получиха различни графики при двете събития. За да се получи оптимално енергийно управление на запълването на мелницата, са използвани два регулатора: регулатор при натоварване и регулатор при разтоварване. Предварителниият избор на закон за регулиране е направен по два метода – метод на Орманс и метода на инфлексна точка. И по двата метода избора на закона за регулиране се получава непрекъснат закон за регулиране с различни настройки на регулаторите.

Симулацията на изчислените настройки на регулаторите показа следните резултати:

1. Първият типов преходен процес (Фиг. 6. 16.) при увеличаване на рудата в полу-автогенната мелница е апериодичен с голямо време на затихване и има по-голямо максимално динамично

отклонение в сравнение с преходната характеристика по Метода на инфлексна точка (Фиг. 6. 18.), но ако сравним времената на затихване на двата преходни процеси, то първият затихва за по- малко време. По отношение на ефективността на автоматичното регулиране на двата метода, сравнявайки изчислената стойност на SIGMA, който идентификатор ефективността за работата на избраният регулатор, съответно за енергийна ефективност при процеса смилане при натоварване с руда на полу-автогенната мелница, то първият типов преходен процес изчислен по метода на Орманс е по енергийно ефективен.

2. Вторият преходен процес (Фиг. 6. 17.) при намаляване на рудата в полу-автогенната мелница с настройки на регулатора по метода на Орманс е апериодичен. Времето на затихване на преходния процес изчислен по Метода на инфлексна точка. (Фиг. 6. 19.) е най малко от останалите три, но има най-голямо максимално динамично отклонение. Преходния процес с минимална интегрално-квадратично оценка се използва тогава, когато допустимото максимално динамично отклонение е от съществено значение за процеса на регулиране. В сравнение с другите три типа процеси Метода на инфлексна точка е с най-малка стойност на SIGMA=595. 36, което го прави по - енергийно ефективен метод от метода на Орманс и най- ефективен от трите процеси.

3. Метода на инфлексна точка. е по - лесен, по-бърз и по- ефективен при изчисляване и определяне на закона за регулиране със съответните настройки за регулиране при управление на запълването на полу-автогенната мелница, като част от процеса смилане в Челопеч.

4. Определени са оптималните настройки на цифровите филтри на микропроцесорния модул MILLCONT 2A за дистанционния датчик SRIP и за директния датчик SDIP, дадени в (Таблица 6. 9.).

5. Сравнителният анализ на параметрите дадени в (Таблица 6. 10.) по каналите за управление, определени по метода на Орманс и Метода по инфлексна точка в посока увеличава и намалява на управляващото въздействие, показва, че има значително съвпадение на получените резултати, но по канала за управление W– Q_0, коефициента SIGMA има по- ниски стойности на и ето защо можем да заключим, че енергийната ефективност е по висока при управлението на захранването на полуавтогенната мелница по товарна клетка.

6. 3. 7. Изследване на влиянието на автоматичен и ръчен режим на работа на процеса смилане на върху енергийната ефективност.

6. 3. 7. 1. Провеждане на експеримента и събиране на данни

Проведени бяха изследванията на автоматичната системата за управление на процеса смилане в полуавтогенна мелница с цел установяване на ефективността от нейната работа. Част от събраните изходни данни при ръчно управление са показани в (Таблица 6. 11.) и автоматично управление на процеса в (Таблица 6. 12.). Всички данни могат да се видят съответно в (Приложение 4).

Данните са осреднени за 1 минута и обхващат периода 26. 10. 21г. от 08:00ч до 00:00ч. през, който са взети по 960 записи от проби от изхода на мелницата през 1 минута и 28. 10. 21г. от 08:00ч до 00:00ч. през, който са взети по 960 записи от проби от изхода на мелницата през 1 минута. В първите колони на таблиците са отразени деня и часа, във вторите ситов статък, в третите колони са записани стойностите на дебит на смляна руда от изхода от полу-автогенната мелница.

Таблица 6. 11.

Време	Изход смилане от ПАМ, ситов остатък, %	Изход дебит на смляна руда от ПАМ, m3/h	Изход плътност на смляна руда от ПАМ, m3/h
26. 08. 08:00ч. -27. 8. 2021 00:00ч.			
08:00:00 ч.	19,35	799,18	1700,67
08:01:00 ч.	83,03	800,19	1701,42
08:02:00 ч.	85,34	800,34	1702,16
08:03:00 ч.	83,87	796,00	1702,91
08:04:00 ч.	79,03	791,00	1703,65
08:05:00 ч.	76,10	786,00	1704,72

Таблица 6. 12.

Време	Изход смилане от ПАМ, ситов остатък. %	Изход дебит на смляна руда от ПАМ, m3/h	Изход плътност на смляна руда от ПАМ, m3/h
28. 08. 08:00ч-29. 8. 2021 00:00			
08:00:00 ч.	74,33	749,12	1688,05
08:01:00 ч.	74,30	749,34	1687,53
08:02:00 ч.	74,27	761,31	1687,01
08:03:00 ч.	74,20	780,90	1686,02
08:04:00 ч.	73,76	800,12	1674,72
08:05:00 ч.	72,72	814,28	1668,59

По време на проведеното изследване в периода 26-28. 10. 2021г. са взети и 64 точки, които са усреднени на всеки 15 мин и за двата режима на работа. Част от тях са показани съответно при ръчно управление на процеса (Таблица 6. 13.) и в автоматичен режим на работа (Таблица 6. 14.).

В първите колони на таблиците са отразени деня и часа по консумирана мощност на полуавтогенната мелница от системата за мониторинг на енергията „Power Logic”, във вторите захранването с руда към полу-автогенната мелницата и в третите колони стойностите от изчислената енергия за тон преработена руда.

Таблица 6. 13.

Време	Мощност на електродви-гател, KW	Захранване на руда на ПАМ, t/h	Консумация за тон преработена руда,KWh/t
26. 08. 08:00ч. - 27. 8. 2021 00:00ч.			
08:00:00 ч.	4672	272,78	17,13
08:01:00 ч.	4947	274,25	18,04
08:02:00 ч.	5000	255,19	19,59
08:03:00 ч.	4843	275,01	17,61
08:04:00 ч.	4995	277,50	18,00
08:05:00 ч.	5082	276,19	18,40

Таблица 6. 14.

Време	Мощност на електро-двигател, KW	Захранване на руда на ПАМ, th/h	Консумация за тон прерабо-тена руда,KWh/t
28. 08. 08:00-29. 8. 2021 00:00			
08:00:00 ч.	5067,151	279,4412	18,13315
08:15:00 ч.	5025,021	277,9139	18,08121
08:30:00 ч.	4942,393	276,9687	17,84459
08:45:00 ч.	4531,136	275,5663	16,443
09:00:00 ч.	4141,062	279,1978	14,832
09:15:00 ч.	4082,633	282,7312	14,43998

6. 3. 7. 2. Анализ на получените резултати

Въз основа на получените данни са определени стойности на математическо очакване M_x, което представлява характеристична стойност на вероятностното разпределение на една случайна величина. Може да се интерпретира като „средна стойност“ на дадена случайна величина[33,34].

$$M_x = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X(i.t_0)$$

t_0- стъпка на дискретизация;

N-брой точки в реализацията.

Изчислена е дисперсията σ2 отразява мярката за разпространението на данните около средната стойност.

Формулата за изчисляване на дисперсията изглежда така:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[x\ (i.t_0 - M_x)]$$

Определено е и средноквадратичното отклонения σ, това може да се разглежда, като добро измерване на разсейването от математическото очакване или средната стойност на измерените точки.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2};$$

Вариациите в събраните данни от автоматичен и ръчен режим от изследваните производствени контури в процеса смилане, получени чрез средно квадратично отклонение от математическо очакване M_x за съответният режим на работа в проценти. Вариацията е определена по формулата[32,33]:

$$V\sigma = \frac{\sigma}{M_x}\ 100\%;$$

Данните през двата периода са анализирани по статистически показатели разглеждайки изследваните параметри плътност, ситов остатък, консумация за преработена руда и дебит на смляна руда.

Таблица 6. 15.

Параметър	Режим на работа	Статистически показатели				
		Mx	σ2	σ	V,%	Кф=Vp/Va
Плътност, g/l	Автомат	1699,68	94,43	9,71	0,57	2,01
	Ръчен	1714,25	391,05	19,77	1,15	
Ситов Остатък, %	Автомат	78,18	10,18	3,19	4,08	20,31
	Ръчен	48,71	1631,51	40,39	82,92	
Специфичен разход на енергия, Kwh/t	Автомат	17,93	1,64	1,28	7,15	5,74
	Ръчен	21,16	75,75	8,70	41,12	
Дебит на смляна руда от ПАМ, m3/h	Автомат	736,61	1019,59	31,93	4,33	2,11
	Ръчен	733,92	4510,87	67,16	9,15	

В (Таблица 6. 15) са изчислено средноквадратичното отклонения σ от математическо очакване M_x при автоматичен режим е по-малко от ръчният режим по всички канали за управление. Коефициента на вариация при двата режима на изходните данни на измерената плътност е < от 50%, което прави варирането слабо, но коефициента на вариация Va при автоматичен режим е 0,57%, който е по малък от коефициента на вариация Vp при ръчен режим е 1,15% Това прави плътността по-стабилна в автоматичният режим. Коефициентът Кф получен от отношението на ръчен Vp и автоматичен Va на плътността на готовия пулп по плътност възлиза на 2,01, който е > 0, това прави разпределението към автоматичният режим на управление на процеса смилане. При ситовия остатък разсейването от математическото очакване отношението M_x е по-малък при автоматичния режим. Съответните коефициентите на вариация Va = 4,08% и Vp= 82,92%, правят отклоненията от математическото отлконение голямо. Кф е 20,31, който прави разпределението към автоматичният режим голямо[34, 35, 36].

Енергията за тон преработена руда при автоматичен режим средно математически M_x е по малка от автоматичният режим на управление. Коефициента на вариация Va при автоматичен режим е < 50%, което прави вариацията слаба, а при Vp ръчен режим е приблизително равна на 50%, което прави варирането умерено. Това прави консумацията на енергия по-ниска и равномерна в автоматичният режим. Коефициентът Кф 5,74, който е > 0, това прави разпределението към автоматичният режим на управление на процеса смилане. Както и при другите канали за управление статистическия анализ на дебита на смляна руда е в полза на автоматичният режим на управление на процесите смилане [37, 38].

По време на изследванията са проведени наблюдения и за средната часова производителност (СЧП) при двата режима на работа. При автоматичен режим СЧП е с над 20% по-голяма, отколкото при ръчното управление на процеса смилане. Съществува резерв за увеличаване на СЧП, което ще

се отрази чувствително за намаляване на разхода на електроенергия, разхода на смилащи топки и увеличаване на експлоатационния срок на бронеоблицовката. Автоматичният режим на работа на системата за управление на процеса мокро смилане води до подобряване на изходните показатели на процеса.

Изводи

По време на изследванията бяха проведени наблюдения на изходните данни и консумираната мощност от полу-автогенната мелница. Средната часова производителност (СЧП) при двата режима на работа при управлението на плътността и дебита на смляната руда са приблизително равни, но при автоматичният режим за управление на плътността и дебита са по-стабилни, което е предпоставка за ефективно флотиране на рудата. При ръчен режим процентното съдържание на едрината смляната руда с размер 140mc е по-малък, което е индикатор за ефективността на процеса смилане. Смилането при автоматичен режим е по- ефективно и стабилно, този показател също е предпоставка за ефективна преработка на рудата в другите етапи на обогатяването на рудата. Енергията за тон преработена руда при автоматичен режим СЧП е с над 15% по-голяма, отколкото при ръчното управление на процеса смилане. Съществува резерв за увеличаване на СЧП, което ще се отрази чувствително за намаляване на разхода на електроенергия, разхода на смилащи топки и увеличаване на експлоатационния срок на бронеоблицовката. Автоматичният режим на работа на системата за управление на процеса мокро смилане води до подобряване на изходните показатели на процеса.

6. 3. 9. Изследване на влиянието на Оптимизатора смилане(АСТ) в полуавтогенната мелница върху енергийната ефективност на процеса.

6. 3. 9. 1. Провеждане на експеримента и събиране на данни

В (Таблица 6. 16.) са събрани данни за три периода от работата на полуавтогенната мелница.

Таблица 6. 16.

Дата	Продуктивност, kWh/t	Мощност. kW	Плътност, g/l	90µ, %	Дебит m3/h	АСТ статус, ON/OFF
Friday, January 1, 2020	13,72998	4148,139	1,337311	72,9775	509,4891	Period 1_ACT-OFF
Friday, January 1, 2021	15,21202	4513,086	1,334402	76,84399	557,1179	Period 1_ACT-OFF
Friday, January 1, 2021	16,47155	4743,565	1,427091	75,06872	551,3523	Period 1_ACT-OFF
Friday, January 1, 2021	17,87403	5034,582	1,372753	70,8617	585,4938	Period 1_ACT-OFF
Friday, January 1, 2021	17,61712	4835,09	1,359404	80,86616	562,7597	Period 1_ACT-OFF
Friday, January 1, 2021	17,38475	4765,953	1,361932	80,94267	562,2549	Period 1_ACT-OFF
Friday, January 1, 2021	16,88602	4588,426	1,361926	83,50458	568,9287	Period 1_ACT-OFF

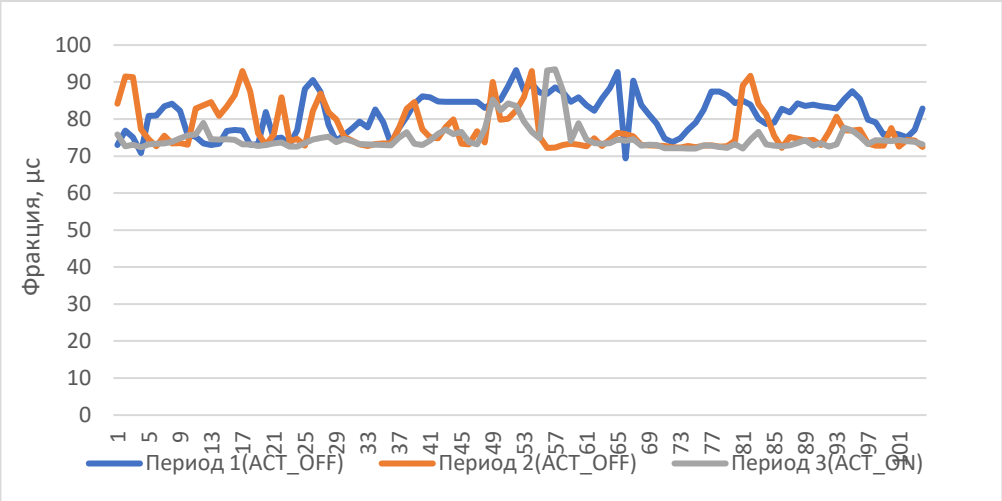
Период 1 от 21. 01. 2022г. до 21. 05. 2022г., в който управлението на процеса смилане е с PID регулатор и изключен регулатор за управление на процента твърдо в полуавтогенната мелница.

Период 2 от 21. 05. 2022г. до 21. 06. 2022г., в който управлението на процеса смилане и процента твърдо в мелницата е с PID регулатор.

Период 3 от 21. 06. 2022г. до 21. 11. 2022г., в който управлението на процеса смилане и процента твърдо в мелницата е с Оптимизатор на смилане (АСТ).

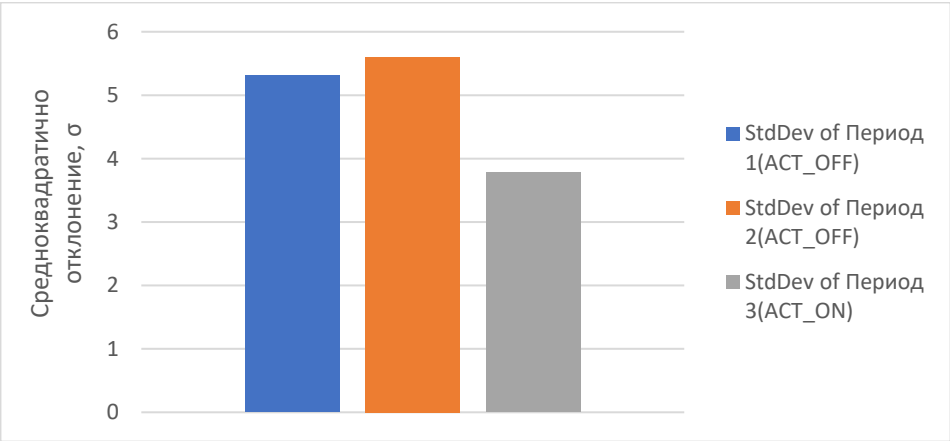
Отчетеният периода обхваща от 21. 01. 21г. до 21. 11. 2022г през, който са взети 22320 записи от проби от изхода на мелницата, продуктивност, консумирана мощност от електродвигателя задвижващ полуавогенната мелница и статус на Оптимизатора на смилана (АСТ). Данните от измерванията от съответните периоди са усреднени за 15 минути (Приложение 5.).

6. 3. 9. 2. Анализ на получените резултати

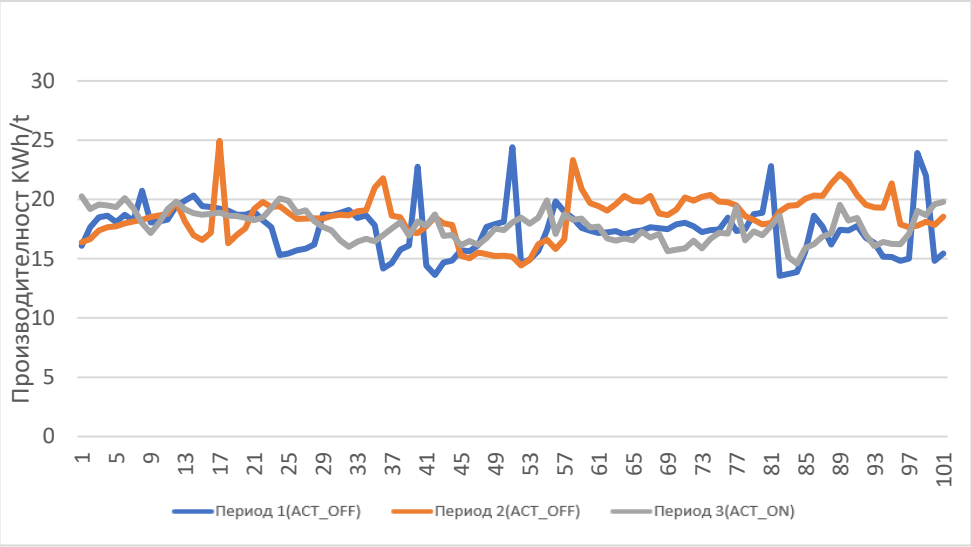


Фиг. 6. 28. Графика на зърнометричен анализ при различните отчетени периоди

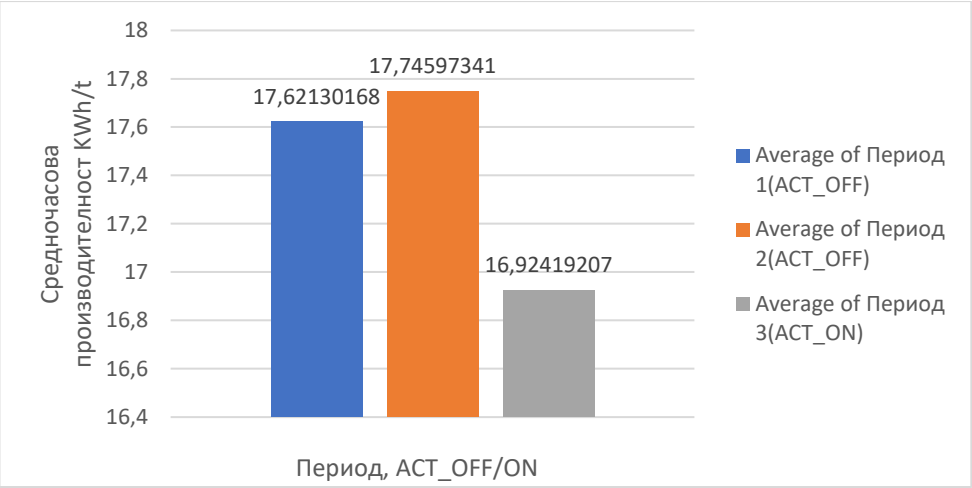
На (Фиг. 6. 28.) са показани трите отчетени периода на процеса смилане описани по-горе към фракцията от изхода на полуавтогенна мелница. Смилането по време на Период 1, варира в много широки граници средното квадратично отклонение е най-голямо(Фиг. 6. 29.), при зададена стойност на зърнометричен състав е 75 µс. По-време на Период 2 вариациите са много по-малки, но не са в зоната на 75µс. И Период 3, когато е включен Оптимизатора на смилане(АСТ),средноквадратичното отклонение на зърнометричен анализ е най-малко, което прави зърнометричният състав е най-стабилен и е в зоната на 75 µс.



Фиг. 6. 29. Графика на средноквадратичното отклонение на зърнометричен анализ при различните отчетени периоди

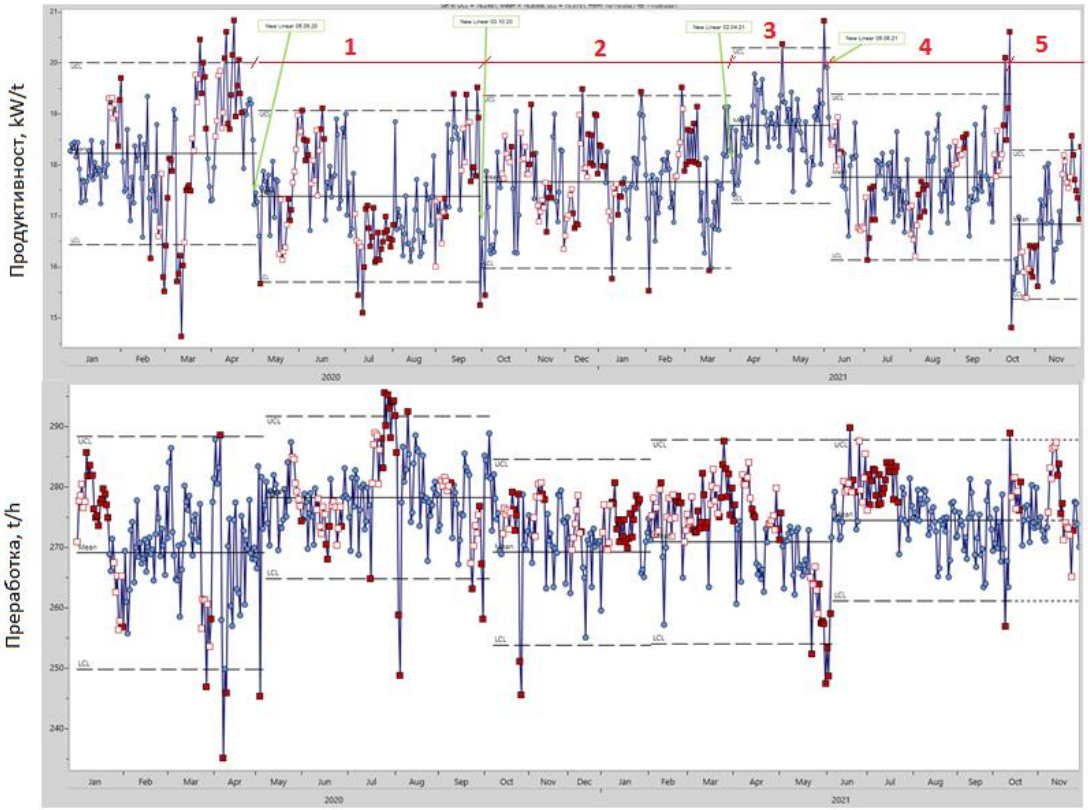


Фиг. 6. 30. Графика на производителност при различните отчетени периоди



Фиг. 6. 31. Графика на средночасова производителност при различните отчетени периоди

На (Фиг. 6. 30.) също се виждат трите отчетени периода на процеса смилане към консумирана мощност за тон преработена руда. По време на Период 1 и Период 2, когато Оптимизатора на смилане(ACT) е изключен, производителността варира в много широки граници. По време на Период 3 когато е включен Оптимизатора на смилане (ACT) производителността е стабилна, а от (Фиг. 6. 31.) се вижда, че през същият период консумацията за тон преработена руда е най- малка 16,9kWh/t.



Фиг. 6. 32. Графики на продуктивността и преработката при различните периоди от живота на облицовката на полуавтогенната мелница.

На (Фиг. 6. 32.) отчетеният периода обхваща от януари 2021г. до ноември. 2022г., като с цифри 1,2,3,4 и 5 са показани и отделните цикли на живот на всяка облицовка на полуавтогенната мелница. По време на цикли на от 1 до 4 се вижда, че след всяка подмяна на износена облицовка на мелницата, в началото преработката е ниска и постепенно започва да се увеличава, през този период продуктивността на полуавтогенната мелница е 16,0-19,5kWh/t и стойностите имат голяма вариация. По време на цикъл 5 е 15,5-18,5kWh/t, а преработката след подмяната на облицовката, в началото е висока и стабилна и с износването на облицовката преработката намалява. В начало продуктивността е 15,5kWh/t и с износването на облицовка продуктивността е 18,5kWh/t.

Изводи

По време на изследванията бяха проведени наблюдения по време, които са взети записи от проби от изхода на мелницата, продуктивност, консумирана мощност от електродвигателя задвижващ полуавогенната мелница и статус на Оптимизатора на смилана (ACT).

Съпоставени са три периода от работата на полуавтогенната мелница при три различни режима на работа, при които се направи анализ на зърнометрията на смляната руда (%), преработката (t/h) и продуктивността на процеса смилане (kWh/t).

Управлението на процеса смилане в режим с Оптимизатор на смилане (ACT) е по-ефективно и стабилно. Зърнометричният състав е индикатор за ефективността на процеса смилане. Този показател също е предпоставка за ефективна преработка на рудата в другите етапи на обогатяването на рудата.

Най-добра ефективност по отношение на изразходваната енергия от електродвигателя задвижващ полуавтогенната мелница за тон преработена руда е при управление на процеса с Оптимизатор на смилане (ACT), съпоставено с автоматично управление на процеса с ПИД регулатор. При класическото ПИД управление на процеса, контролерът извършва управлението само по един канал и носи единична стойност близка до зададена точка, като се използва една манипулирана променлива.

От друга страна, управлението с Оптимизатора на смилане(ACT) прави връзка между ПИД регулаторите на различните процеси, като носи няколко стойности, близки до оптималните цели едновременно с помощта на няколко манипулирани променливи. управлението няма връзка между ПИД регулаторите на различните процеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постиженията в дисертационния труд могат да се систематизират по следния начин:

Направени са обзор, анализ и систематизация на методи и средства за реализация на смилателни процеси (мелници, мелещи тела и мелещи среди, параметри на процесите на раздробяване и смилане). Предложени са методики и алгоритми за моделиране и изследване на смилателните процеси, и тяхната ефективност оценена по разхода на електрическа енергия.

Използван е софтуер за аналитични преобразувания, числени пресмятания и графично представяне на получените резултати, Matlab.

Изследвани са влиянията върху енергийната ефективност при изменения на конструктивни, технологични и автоматизирани фактори при процеса смилане в полуавтогенна мелница SAG 8,5 x 5,3м.

- Изследвано е влиянието на модифицирани модули (разтоварни гумирани решетки на изхода на мелницата с размери на отворите 23mm и 25mm) върху енергийната ефективност при процеса смилане.
- Изследвано е влиянието на ъгъла на падане на рудата в мелницата със системата MillSense върху енергийната ефективност при процеса смилане.
- Извършен е експеримент с оптимизатор на процеса смилане (ACP) мелницата и е направена оценка производителността на мелницата при оптимален разход на енергия.
- Изследвано е влиянието на новоизграден е контур на базата на разработените нови технически средства: дистанционен SRIP и директен SDIP датчици за измерване на ударни импулси генерирани от ударите на рудата в облицовката на полуавтогенната мелница.

- Съставена е обобщена блокова схема по каналите за управление на полуавтогенната мелница, определени са управляващите въздействия, междинните регулируеми величини, изходните регулируеми величини и смущаващите въздействия и е разработена схема на измерваните и регулируемите параметри.
- Изследвано е влиянието на автоматичен и ръчен режим на работа на процеса смилане върху енергийната ефективност.
- Изследвано е влиянието на определени на типове регулатори и закони върху енергийната ефективност в автоматизирани системи в процеса смилане.
- Изследвана е ефективността на регулатори в едноконтурни системи за автоматично регулиране на процеси в полуавтогенни мелници с диалогова програма за симулиране на работата и, която е създадена в Matlab среда.

Предложени са оптимални конструктивни, технологични и автоматизирани решения влияещи върху по-добрата енергийната ефективност при процеса смилане в полуавтогенна мелница SAG 8,5 x 5,3м.

- Предложени са модифицирани смилателни модули (разтоварни гумирани решетки на изхода на мелницата с размери на отворите 23mm и 25mm) с цел получаване по-добри параметри на смления материал при оптимален разход на енергия.
- Извършен е експеримент със системата MillSense осигуряваща онлайн измерване на ъгъла на падане на рудата в мелницата и е направена оценка производителността на мелницата при оптимален разход на енергия.
- Предложен е с оптимизатор на процеса смилане (ACP) мелницата и е направена оценка производителността на мелницата при оптимален разход на енергия.
- Изграден е контур на базата на разработените нови технически средства: дистанционен SRIP и директен SDIP датчици за измерване на ударни импулси генерирани от ударите на рудата в облицовката на полуавтогенната мелница и нов двуконтурен микропроцесорен управляващ модул MILLCONT 2A с цел получаване по-добри параметри на смления материал при оптимален разход на енергия.
- Предложени са определени на типове регулатори и настройки за по- добра ефективност на смилане и енергийна ефективност.
- Предложена е диалогова програма за симулиране на работата и ефективността на регулатори в едноконтурни системи за автоматично регулиране на процеси в полуавтогенни мелници, която е създадена в Matlab среда.

Направените предложенията и анализираните резултатите от извършените експерименти, могат значително да повишат качеството на продукцията и да повишат енергийната ефективност, с което реално да се намалят времената и разходите в производството.

От дисертационният труд може да се формулират следните приноси:

1. Научно приложни:

- Анализирани и систематизирани са в своята пълнота различните фактори и средства за реализация на енергийната ефективност при процеса смилане.
- Доказано е, че най-добра ефективност по отношение на изразходваната енерия от електродвигателя задвижващ полуавтогенната мелница за тон преработена руда е при управление на процеса с Оптимизатор на смилане (АСТ), съпоставено с автоматично управление на процеса с ПИД регулатор.
- Изведени са регресионните уравнения и съответно коефициент на детерминация при всяка една от регресионните криви на факторите, обуславящи технологичния процес.

2. Приложни:

- Предложени са оптимални конструктивни, технологични и автоматизирани решения влияещи върху по-добрата енергийната ефективност при процеса смилане в полуавтогенна мелница SAG 8,5 x 5,3м.
- Предложени са модифицирани смилателни модули (разтоварни гумирани решетки на изхода на мелницата с размери на отворите 23mm и 25mm) с цел получаване по-добри параметри на смления материал при оптимален разход на енергия.
- Извършен е експеримент със системата MillSense осигуряваща онлайн измерване на ъгъла на падане на рудата в мелницата и е направена оценка производителността на мелницата при оптимален разход на енергия.
- Предложен е с оптимизатор на процеса смилане (АСР) мелницата и е направена оценка производителността на мелницата при оптимален разход на енергия.
- Изграден е контур на базата на разработените нови технически средства: дистанционен SRIP и директен SDIP датчици за измерване на ударни импулси генерирани от ударите на рудата в облицовката на полуавтогенната мелница и нов двуконтурен микропроцесорен управляващ модул MILLCONT 2A с цел получаване по-добри параметри на смления материал при оптимален разход на енергия.
- Предложена е диалогова програма за симулиране на работата и ефективността на регулатори в едноконтурни системи за автоматично регулиране на процеси в полуавтогенни мелници, която е създадена в Matlab среда.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

На реферирани списания в чужбина:

1. Penzov T., Petrov P. “New technical means for control of grinding process” „РУДАРСКИ ГЛАСНИК“, vol. 1-2,. CXVII, 2020.

На Международни конференции в България

1. Петров П., Исталиянов Р. „Електроенергийна ефективност на полуавтогенна мелница“, Годишник на МГУ „Св. Иван Рилски“, 2020г.
2. Петров П. „ Изследване на процеса смилане със система за измерване на ъгъла на падане на рудата в полуавтогенна мелница Сборник на Национална научно-техническа конференция с международно участие – „Букамк’20 Автоматизация в минната индустрия“, 19-20. 11. 2020г.
3. Пензов Т., Петров П. „Microprocesser control systems for wet grinding of raw materials and ore” Сборник на Национална научно-техническа конференция с международно участие-Букамк’20 „Автоматизация в минната индустрия, 19-20. 11. 2020г.

SUMMARY

The present dissertation work examines and analyzes the types of mills, their internal lining and the working process. The modes of operation and the principles of the grinding process in semi-autogenous mills are examined. Described the design and technological factors for identification of the grinding process in the DPM "Chelopech". The technological scheme of the company and the main equipment involved in ore processing are presented.

Considered approaches and methods for theoretical research of various methods, means and automatic control of grinding processes. Control of grinding processes with a PID regulator with settings calculated by several methods and control with an ACP regulator is described.

The results achieved by scientific research and research in production are presented. An analysis was made of the results obtained with technological, constructive and automated changes in the grinding process. Simulations were carried out with a dialog program to evaluate the performance and electrical efficiency of regulators for automated process control in a semi-autogenous mill.