



Минно-Геоложки Университет

“Св. Иван Рилски” – гр. София

Минно електро-механичен факултет

КАТЕДРА “ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ И ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ”

МАГ. ИНЖ. Стоян Иванов Четьов

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА СПЕЦИФИЧНИЯ РАЗХОД НА
ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ НА ТОПКОВИ МЕЛНИЦИ И
МЕТОДИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ИМ
ЕФЕКТИВНОСТ**

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

София, 2021

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ към Минно-електромеханичен факултет на Минно-Геоложки Университет - София, проведен на 18.11.2021 г., съгласно Ректорска заповед № 843/08.11.2021г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред научно жури, утвърдено със заповед № Р-890/25.11.2021г. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на 03.02.2022 год. от 11:00 часа в Зала 105 на МГУ „Св. Иван Рилски“

Материалите по защита са на разположение на интересувашите се в Сектор „СТУДЕНТСКА И ПРЕПОДАВАТЕЛСКА МОБИЛНОСТ“ на МГУ „Св. Иван Рилски, София, Студентски град, Ректорат, ет. 3 , стая 79.

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. доц. д-р инж. Илиян Христов Илиев - МГУ, катедра ЕС и ЕО
2. проф. д-р инж. Васил Димитров Димитров - ВТУ „Тодор Каблешков“
3. доц. д-р инж. Ивайло Стефанов Стоянов - ТУ Русе
4. доц. д-р инж. Орлин Любомиров Петров - ТУ Русе
5. доц. д-р инж. Христо Тодоров Ибришимов - ТУ Габрово

Резервни членове:

1. доц. д-р инж. Валери Петров Гочев - МГУ, катедра ЕС и ЕО
2. проф. д-р инж. Цанчо Борисов Цанев - външен член

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1. проф. д-р инж. Васил Димитров Димитров
2. доц. д-р инж. Ивайло Стефанов Стоянов

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ на Минно-електромеханичен факултет.

Дисертационният труд съдържа 138 страници. Научното съдържание е представено в увод и 6 глави. Включва 50 фигури и 21 таблици. Цитирани са 121 литературни източника. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Автор: маг. инж. Стоян Иванов Четъов

Заглавие: Изследване на специфичния разход на електроенергия на топкови мелници и методи за повишаване на енергийната им ефективност

Тираж: 20 броя

Отпечатано в Издателска къща „Св. Иван Рилски“, София.

Обща характеристика на дисертационния труд

1. Актуалност на проблема

Дисертационния труд е посветен на решаването на проблема с изследването на специфичния разход на електроенергия на топкови мелници и предлагане на методи за повишаване на енергийната им ефективност.

Сред различните отрасли на индустриалното производство един от най-енергоемките е черната и цветната металургия, която има много високо ниво на развитие в световен мащаб. Развитието на металургията изисква увеличаване на добива и подобряване на качеството на рудните суровини, налага участието в преработката на бедни руди и по-нататъшното им обогатяване. Годишното производство на такива руди непрекъснато и систематично се увеличава.

Съвременните предприятия за добив и преработка на руда са големи, силно механизирани и много енергоемки промишлени производства. Те включват различни технологични обекти (комплекси), свързани помежду си от технологичния процес на рудодобив до обогатяване и получаване на концентрат. Такова предприятие е оборудвано с голям брой от различни технологични механизми и агрегати. Мощността на електродвигателите на отделни технологични механизми се колебае в относително широк диапазон и може да надхвърли 20 MW. Общата инсталирана мощност на електродвигателите на отделни минно-добивни предприятия у нас достига до 50-100 и повече MW. Захранването им се извършва главно от електрически мрежи с напрежение 110 kV.

2. Цели и задачи на дисертационния труд

Основната **цел** на работата е разработване на методи за повишаване на ефективността на използването на електроенергия за задвижването на топкови мелници.

В дисертацията са формулирани следните **задачи**:

1. Теоретично и експериментално изследване зависимостта на използваната електроенергия от технологичните фактори, обуславящи процес смилае.
2. Изследване на загубите на мощност и електроенергия в задвижването на топкови мелници и режимите на работа на електродвигателите.

ГЛАВА I. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Значителните мащаби и темпове на растеж на добивната и преработваща продукция в световен мащаб, бързото развитие на съществуващите и въвеждането в експлоатация на нови комплекси, изискват специално внимание на въпросите за рационалното потребление на електроенергия и повишаване на ефективността на използването му от тези предприятия. Както показва практиката, минните и преработвателните предприятия имат реални възможности да пестят електроенергия и да повишават производствената си ефективност. Най-важното направление при решаването на този проблем в условията на минни и преработвателни предприятия е оптимизацията на потреблението на електроенергия от отделни технологични механизми, групи механизми и др. на базата на подобряване на технологичните процеси и мероприятия, определящи оптималните режими на работа на технологичното оборудване. В същото време, разбира се, могат да бъдат идентифицирани енергийно ефективни режими на работа на електрическата мрежа, при които доставката на електроенергия като цяло и към отделни производствени комплекси се извършва с по-малко загуби. Това може да стане само въз основа на задълбочено и всеобхватно проучване на моделите на потребление на електроенергия от технологични механизми, като се вземат предвид промените в различни технологични фактори, които характеризират добива и преработката. Трябва обаче да се отбележи, че голям брой от тези закономерности все още не са проучени достатъчно ясно или изобщо не са идентифицирани. Следователно, идентифицирането и изучаването на тези модели става първостепенно при решаването на проблема за увеличаване на ефективността на използването на електроенергия от минни и преработвателни предприятия.

Рационалното електропотребление се явява един от факторите, способстващ за устойчивото развитие на икономиката във всички отрасли на промишлеността. Един от най-енергоемките отрасли е производството на метални концентрати. Повишаването на ефективността при тяхното производство, основно зависи от икономия на разхода на електроенергия, използвана в процеса на смятане на рудите. На тази основа са направени различни научни разработки, от които следва, че най-големия разход на електроенергия е в процеса смятане. В частност, до 42% от цялата електроенергия се потребява от асинхронни и синхронни електро задвижвания, използвани в този процес. Разгледани са варианти за енергийно ефективни методи за задвижване на промишлени мелници. В зависимост от технологичния процес, факторът на мощността и коефициента на полезно

действие, зависят от натоварването на всички двигатели и възбудителните токове на синхронните двигатели. Изследвани са възможностите за използване на реактивната мощност, генерирана от синхронните двигатели за подобряване ефикасността от работата на асинхронните двигатели. Доказва се, че при определени условия, въпреки значително по-големите загуби на активната мощност за генериране на 1 kVAr реактивна (капацитивна) мощност спрямо кондензаторните батерии, СД могат да се използват ефективно за подобряване на фактора на мощността. Поддържането на консумация на реактивна енергия $\cos\varphi = 0.9$, води до осезателно намаляване на консумираната активна мощност за компенсация и до спестяване на значителни парични средства. Разгледани са проблемите за компенсиране на реактивните товари в предприятия със силно неравномерен електрически товар, като е предложена методика, базираща се на експериментални изследвания, даваща възможност за анализиране на многовариантни решения.

От правилния избор на топковия товар зависи производителността на мелницата и следователно специфичния разход на електроенергия. Както завишения, така и занижения топков товар води до намаляване на производителността на мелницата, което предизвиква повишаване на специфичния разход на електроенергия. При добре подбран топков товар на мелницата, работеща в затворен цикъл, може да се допусне повишение на циркулационния товар при едновременно увеличение на производителността на мелницата, снижавайки специфичния разход на електроенергия и подобрявайки технологичните показатели.

Мелниците се изработват с различни конструкции. При някои мелници работният цилиндър на мелницата е сепариран чрез решетки разположени във вътрешността му. По този начин те го разделят на няколко отделения. Решетките не позволяват на по-едрите частици да преминат в следващото отделение. По този начин се осигурява възможност в отделните отделения да се смила продукцията до определен размер, като освен това размера на мелещите тела също може да бъде различен. При този тип мелници има възможност за сепариране на различните фракции за смилане. При тези конструкции на цилиндрични мелници, в които са монтирани класифициращи устройства се получава вътре, в самата мелница сепариране на продукта. Монтирането в корпуса на барабана на различни енергообменни устройства, под формата на наклонени прегради води до по-интензивно движение на мелещите тела. Това допринася също и за понижаване на разхода на енергия и на мелещи тела. При барабанните топкови мелници материала най-често постъпва централно в цилиндъра през отвор на хранящият капак. При падането на мелещите тела се разрушават частиците намиращи се между тях.

След осъществяването на процеса смилане, готовият продукт напуска мелницата през централен отвор в разтоварващия капак директно или през решетка. Един от основните фактори, влияещ на ефективната работа на топковите мелници е режима на работа на топковия товар. Съществуващите конструкции на барабанните мелници, използвани за смилане на руди, обезпечават не повече от 40 % активно участие на мелещите тела в процеса на смилане от общото количество намиращо се в барабана на мелницата. Останалата част във вид на плътен компактен слой се премества в централната част и по никакъв начин не влияе на смилания се материал. В качеството на топков товар най-често се използват чугунени или стоманени топки с диаметър 30÷120 mm. Известно е, че между режима на работа на смиланите тела и размера на натрошения материал има определена зависимост. Много често се използва такъв начин на работа, при който в различните участъци на цилиндричната мелница се създават различни режими на работа: в началото на мелницата е водопаден режим за смилане на големите частици с удар, в средата се смилва с водопадно-каскаден режим, а в края е каскаден режим за смилане и стриване на малките частици.

Разхода на енергия за топковите мелници е функция от много фактори: физическите свойства на рудата (тегло и твърдост), оборотите на барабана, запълването му с топки и др. Големият разход на енергия основно се изразходва за износването на топките и корпуса на мелницата, триене, нагряване на материала и т.н.. Не трябва да се забравя, че при работа на мелницата на празен ход (запълнена само с топки), без в нея да има материал, разхода на електроенергия е приблизително равен, както при пълно натоварване. Установено е, 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. Предимство на топковите мелници е тяхната проста конструкция, висока надеждност и добро смилане. При работата си мелещите тела намиращи се в мелницата се износват и техният размер намалява, като това съответно води и до промяна на характеристиките на процеса. Износването зависи от много фактори: скорост на въртене и диаметър на барабана, работния индекс на смилаемия материал и негово специфично тегло, облицовката на мелницата, твърдостта на топките и други фактори.

Изводи:

1. Направен е обстоен преглед по темата и проведените научни изследвания в световен мащаб, като са цитирани изводи от публикации касаещи тематиката.

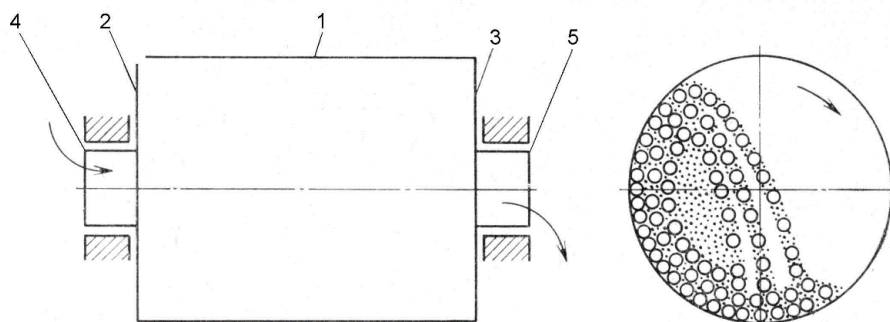
2. Разгледани са различните режими на работа, техните предимства и недостатъци, както и са посочени препоръчителните режими за работа на мелничните агрегати базиращи се на опита в редица промишлени предприятия по света.
3. Консумираната от мелничните агрегати електроенергия зависи най-вече от количеството на смилащата среда, при което определящ фактор за икономия е специфичният разход на електроенергия за количество преработена продукция.
4. Върху количеството и качеството на преработената продукция съществено влияе технологичния процес на смилане.

Глава II БАРАБАННИ МЕЛНИЦИ

II.1. Принцип на действие и конструктивен преглед на барабанните мелници

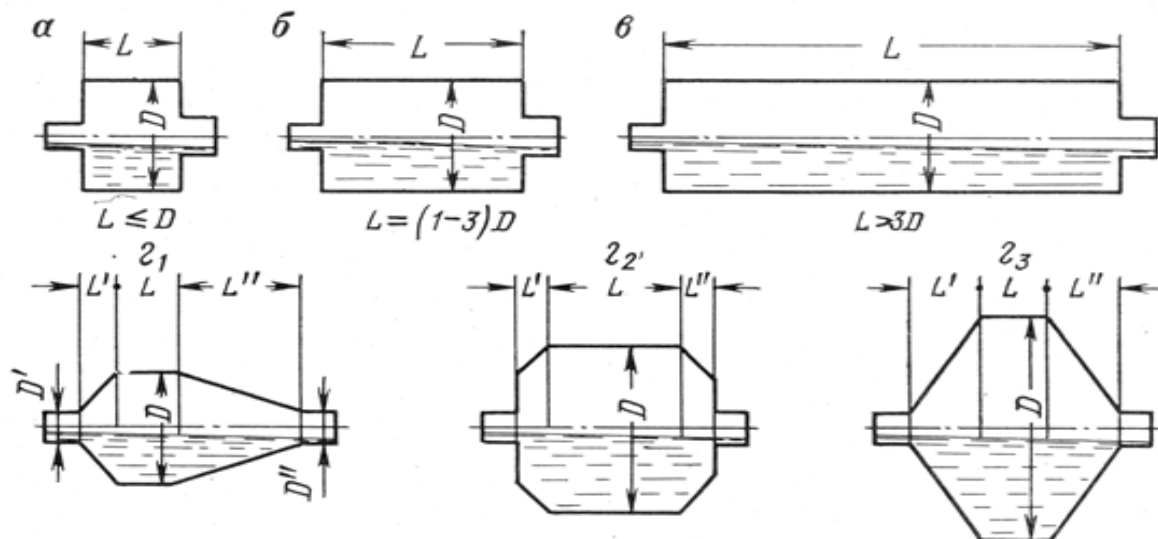
В самото начало барабанните мелници са използвали като смилаща среда камъни. Появили са се в края на 19 век и са имали размери 1 метър диаметър и 1 метър дължина. През годините е нараснала необходимостта от използване на все повече метали, а тяхното съдържание в разработените находища постоянно намалява. Икономически е по-изгодно да се увеличават все повече размерите на произвежданите барабанни мелници, вместо да се добавят много на брой по-малки. Нарастването им през годините става възможно и поради подобряване на конструкциите, като например големия прогрес при задвижването им. Понастоящем размерите са се увеличили до над 12 m диаметър и над 7 m дължина. За задвижване се използват електрически мотори с мощност надвишаваща 20 MW.

Барабанната мелница показана на Фиг. II-1 се състои от барабан 1 и странични дъна 2 и 3, към които са закрепени кухите шийки 4 и 5. Чрез шийките мелницата се монтира на лагери, позволяващи свободното ѝ въртене около хоризонталната ос.



Фиг. II-1. Схема на барабанна мелница

В мелницата се поставят необходимото количество смилащи тела. При въртенето си барабана увеличава топките чрез силата на триене, те се издигат до определено ниво, след което падат или се свличат надолу. Постъпилия в мелницата материал се смилва чрез удар, стриване и смакване под действието на смилащата среда. Работата на мелницата се осигурява чрез непрекъснатото движение на материала, който постъпва през едната, а се разтоварва през другата шийка.



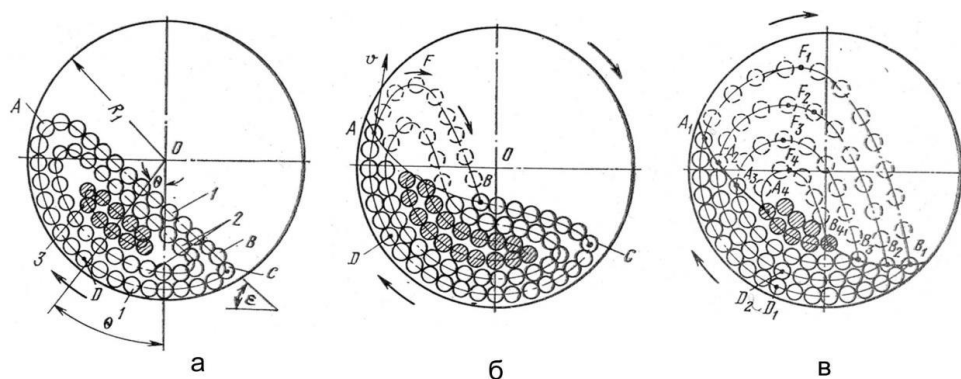
Форма на барабана на барабанните мелници - фиг. II-2

От това каква е формата на барабана мелниците могат да се характеризират като цилиндрични (Фиг. II-2.а,б,в) и цилиндрично-конични (Фиг. II-2.г₁, г₂, г₃). Цилиндричните биват къси, дълги и тръбни. Характерно при късите барабанни мелници е, че при тях дължината на барабана е по-малка или равна на диаметъра му. При дългите дължината е от един до три пъти по-голяма от диаметъра. Тръбни са тези барабанни мелници при които дължината на барабана е три или повече пъти по-голяма от диаметъра му.

II.2. Режими на работа на барабанните мелници.

Каскадният режим на движение на смилащите тела се осъществява при малка честота на въртене на барабана. При завъртането на мелницата мелещата среда се премества и телата започват да се движат по затворени траектории. Криволинейната повърхност на откоса им представлява равнината АС, която е под ъгъл спрямо хоризонта, равен на пределния ъгъл на обръщане (Фиг. II-12.а). Когато режима на движение се установи, смилащата среда остава в това положение; топките непрекъснато циркулират, повдигат се по кръгова траектория и се спускат след това каскадно надолу от точка А до

изходната точка. В централната част на смилащата среда е зона 3 (Фиг. II-12.а – заштрихована) или “ядро”, която остава малко подвижна.



Фиг. II-12 Режими на работа на барабанни мелници

Смесен режим на движение на смилащите тела е показан на (фиг. II-12. б). Показаното с пунктир е положението на топките, които се намират в полето по траектория AFB, а с плътни линии на тези, които се преместват търкаляйки се по траектория BCDA. При смесения режим в каскадното движение участват също и топки, разположени между външните слоеве и малкоподвижното “ядро”, около което и става тяхната циркулация.

Водопадният режим на движение на смилащите тела в мелниците (Фиг. II-12. в) се осъществява при честота на въртене на барабана, осигуряваща прехода на всички или на болшинството от слоевете от смилащите тела от кръгова и параболична траектория.

II.3. Производителност на барабанните мелници

При технологичните пресмятания на производителността на барабанните мелници, за еталон се приема специфичната производителност $q, t / h.m^3$ по изходен продукт за един кубически метър обем от барабана на мелницата. Специфичната производителност зависи от много фактори, като скоростен режим на смилане, вид и количество на смилащата среда, едрина на постъпващия и готов продукт, физико-механични свойства на минералите, относителна ъглова скорост на барабана на мелницата и др.

Тогава общата производителност на барабанната мелница по изходящ продукт ще бъде:

$$Q = q.V, t/h \quad (II-1)$$

Където:

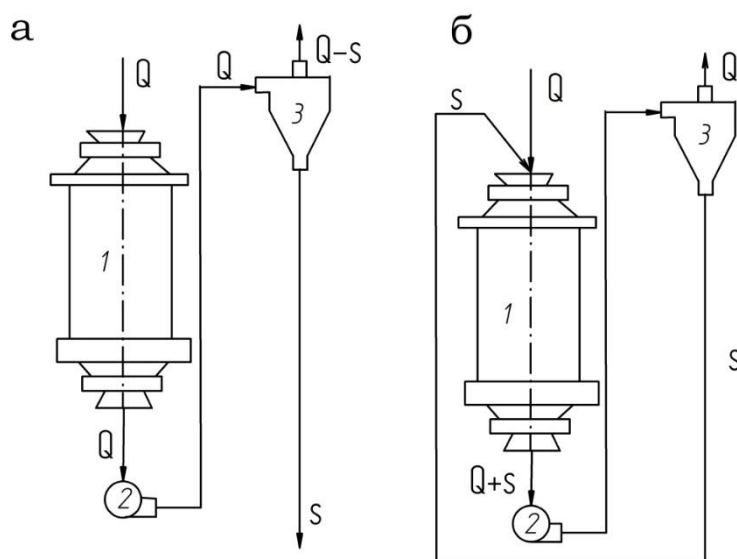
$q, t / h.m^3$ е специфична производителност на мелницата;

V, m^3 - работен обем на мелницата.

II.4. Схеми на смилане. Циркулационен товар

Схемите на смилане показват движението на материала по време на процеса смилане с барабанны мелници. Най-често се прилагат схеми с отворен, затворен и частично затворен цикъл.

Схемата на смилане с **отворен цикъл** (Фиг. II-13.а) се използва при прътовите мелници, както за сухо, така и за мокро смилане, както и при топковите за сухо смилане. При тази схема материалът преминава през мелницата еднократно, като след нея се получава готовия продукт.



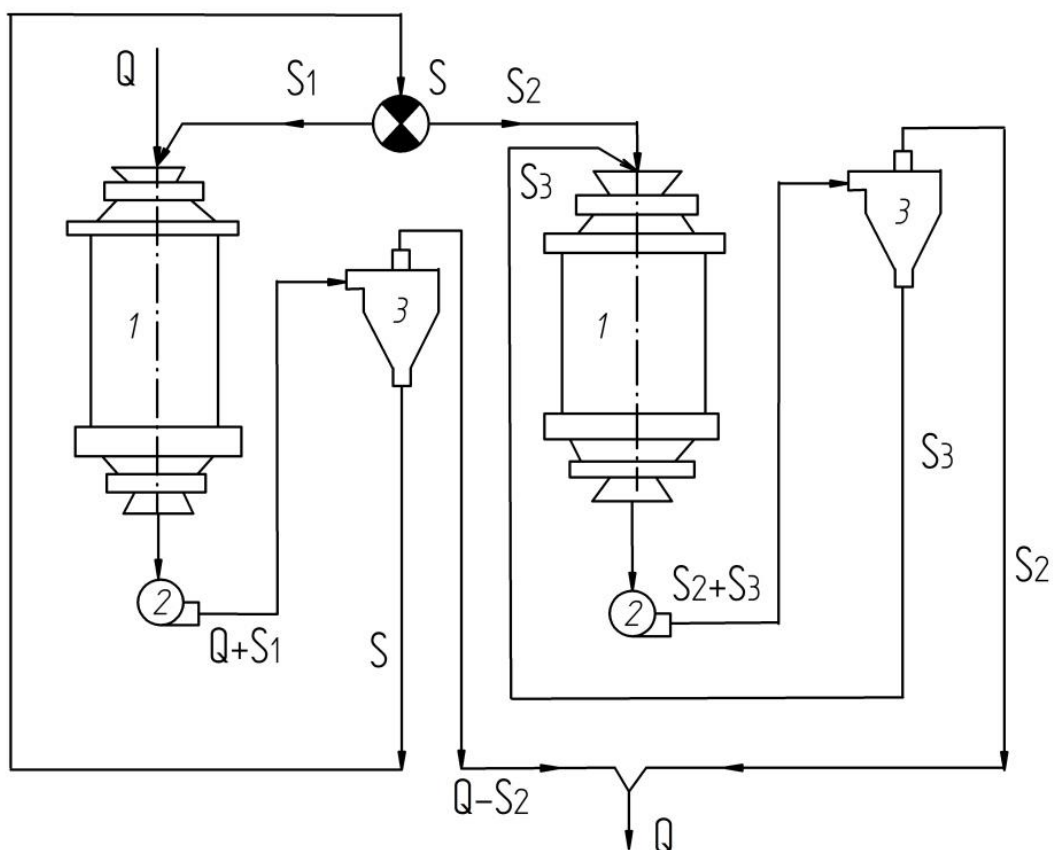
Фиг. II-13. Схеми на смилане с отворен и затворен цикъл

1 – мелница; 2 – помпа; 3 – хидроциклон

Схемата на смилане със **затворен цикъл** (Фиг. II-13.б) се използва при мелниците за мокро смилане. В този случай мелницата и класифициращия хидроциклон представляват общ агрегат наречен мелничен агрегат. Подаването на материала става направо в мелницата, като след нея материалът постъпва в класифициращо устройство (механичен класификатор или хидроциклон), където се разделя на готов продукт (прилив) и едър клас-пясъци. Пясъците се връщат обратно в мелницата за досмилане.

Потокът от пясъци обикаля непрекъснато от мелницата към класифициращото устройство и обратно, като при установен режим на работа той е постоянен и се нарича циркулационен товар.

Схемата на смилане с **частично затворен цикъл** (Фиг. II-14) е характерна с това, че не всичките пясъци отделени от класифициращото устройство, се връщат в мелницата. През нея минават само известна част от тях S_1 , а останалите S_2 отиват в следващ етап на смилане.



Фиг. II-14. Схеми на смилане с частично затворен цикъл

1 – мелница; 2 – помпа; 3 – хидроциклон

Изводи:

1. Обстойно са разгледани основните типове мелници, тяхното развитие и подобрения през годините.
2. Детайлно са представени различните типове мелници, като е акцентирано най-вече върху топковите барабанни мелници, тяхната механична конструкция, предимства и недостатъци. Показани са различни видове футеровки, механично и електрическо задвижване на агрегата.
3. Представени са различните технологични схеми при които работи мелничния агрегат.

ГЛАВА III. СТАТИСТИЧЕСКО ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАЗХОДА НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ, В ЗАВИСИМОСТ ОТ ФАКТОРИТЕ, ОБУСЛАВЯЩИ ТЕХНОЛОГИЧНИЯ ПРОЦЕС

Когато е необходимо да се изследва наличието или отсъствието на статистически значима връзка между даден обект или явление (наречен по нататък следствие, резултат или зависима променлива) и един или повече

фактори (наречени независими променливи) се използват корелационният и регресионният анализ. Независимата променлива в математиката често се нарича регресор, а зависимата – предикатор. Регресионният и корелационният анализ са два аспекта на анализа на статистическата връзка. Те са тясно свързани помежду си и се основават на общи методологически принципи.

При изследване на зависимостта между едно явление-резултат и едно явление-фактор се говори за единична регресия, респективно корелация или още еднофакторен регресионен и корелационен анализ. В случаите на два и повече явления-фактори става въпрос за множествена регресия и корелация или за многофакторен регресионен и корелационен анализ, което е по-честата практика. Възможно е при многофакторния анализ интерес да представлява и влиянието на всеки отделен фактор при елиминиране на останалите, а не само съвкупното влияние на всички фактори. В първия случай се говори за частна регресия и корелация, а във втория – за множествена регресия и корелация.

III.1. Корелационен анализ

Корелационният анализ дава представа за силата на статистическата зависимост. Най-ясно това може да се изрази с числов израз и в статистиката това е така нареченият корелационен коефициент.

Най-общо корелационните коефициенти могат да се разделят на три категории:

- параметрични;
- рангови;
- непараметрични.

Параметричните корелационни коефициенти измерват степента на зависимост на явления, представени с количествени променливи. Те могат да бъдат обикновени (единични – при един фактор), множествени или частно-множествени. Пример за това е коефициентът на Пийърсън.

Ранговите корелационни коефициенти измерват степента на зависимост на явления, представени на ординални скали. В този случай основно се прибегва до коефициентите на Спирман или на Кендал.

Непараметричните корелационни коефициенти се прилагат за измерване степента на зависимост между явления, представени на слаби статистически скали. Има голямо разнообразие от подобни коефициенти в зависимост от вида на скалите.

За разглежданата в дисертационния труд ситуация е най-логично използването на коефициента на Пийърсън или негов вариант като коефициент на Браве. Той се изменя в интервала $[-1, 1]$ и може да се прилага към всякакъв вид количествени променливи. Абсолютната му стойност показва силата на

зависимостта, а знакът му – посоката на зависимостта. Ако коефициентът е положителен, то зависимостта е правопрпорционална, като често се нарича възходяща. Ако е отрицателен то зависимостта е обратнопрпорционална или низходяща. Една от възможните предлагани скали е:

- $R=0$ – липсва зависимост;
- $R \in (0, 0.3]$ – слаба зависимост;
- $R \in (0.3, 0.7]$ – умерена зависимост;
- $R \in (0.7, 0.9]$ – силна зависимост;
- $R > 0.9$ – много силна,

където R е коефициентът на Пиърсън, който в случай на еднофакторен анализ може да се пресметне по формулата:

$$R = \sqrt{1 - \frac{S_y^2}{\sigma_y^2}} \quad (\text{III-1})$$

като

$$S_y^2 = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{N}} \quad \text{– е остатъчната дисперсия на зависимата променлива}$$

$$\sigma_y^2 = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{N}} \quad \text{– е общата дисперсия на зависимата променлива}$$

N – брой на наблюденията.

Понякога може да се изчислява коефициентът на корелация и без да се търси регресионна зависимост. Тогава е по-удачно да се използва предложената от Браве формула

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N \sigma_x \sigma_y} \quad (\text{III-2})$$

или

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{III-3})$$

където:

- x_i и y_i са стойностите съответно на независимата и зависимата променлива в i -ия експеримент;
- $\bar{x}$ и $\bar{y}$ са съответно средно-аритметичните стойности на променливите;
- сумите са по броя на елементите в извадката N .

Обикновено в професионалните статистически софтуерни продукти се дава квадрата на коефициента на корелация, което улеснява анализа. Така може зависимостта между двете променливи се представи като процент от вариации между тях и в този случай се говори за коефициент на детерминация. Напр. ако $r = 0.8$, то $r^2 = 0.64$, което означава, че 64% от промените в предикатора са в резултат от измененията на факторната/факторните променливи.

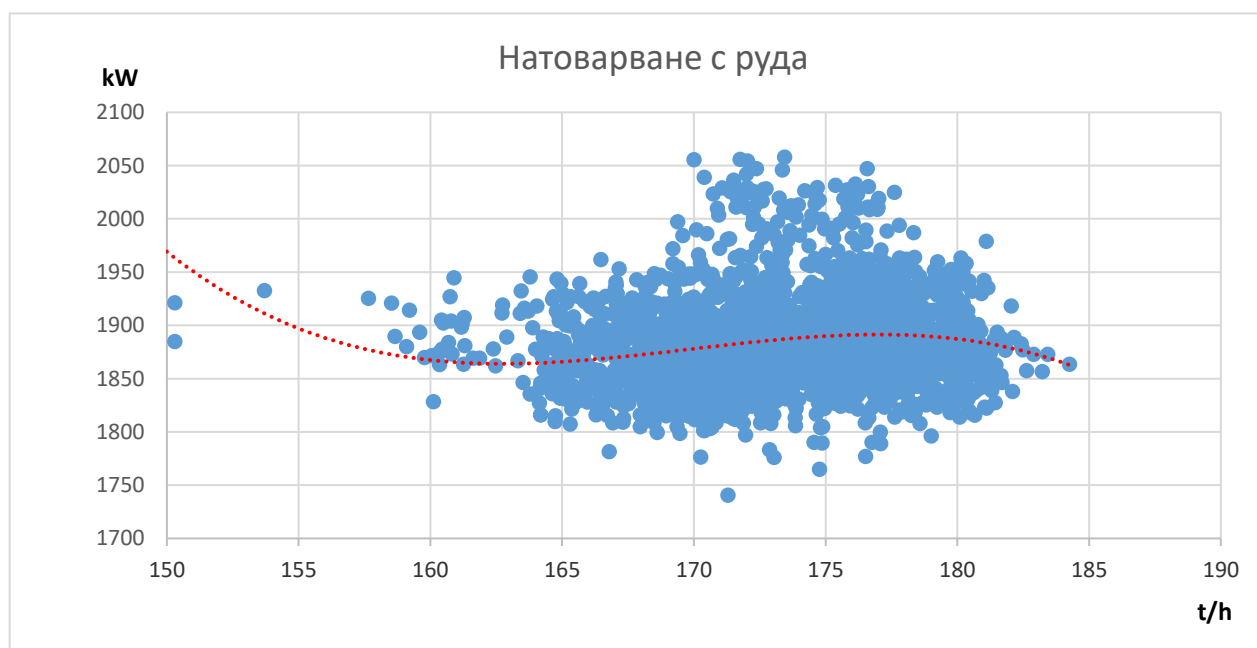
III.2. Регресионен анализ

Чрез регресионния анализ се определя *характерът* на връзката между две и повече променливи.

При изследване на връзката между две случайни променливи X и Y формата на връзката се задава чрез регресионна функция $y = f(x)$, респективно $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ при многофакторен анализ. Тази функция може да бъде линейна, полиномиална, логаритмична, показателна и т.н. За предварителна оценка на вида на функцията може да се съди от графичното представяне на данните като се направи точкова диаграма (диаграма на разсейването). В последващото моделиране обикновено по метода на най-малките квадрати се определя математическият модел, т.е. изчисляват се параметрите на функцията за съставяне на регресионното уравнение.

III.3. Анализ на влиянието на основните технологични параметри върху мощността на двигателите, задвижващи топковите мелници

Направен е анализ на влиянието на няколко основни фактора върху мощността на двигателите. Обработени са данни за една година на мелничните агрегати, записани от информационно-управляващата система на предприятието. На база статистическата обработка на базата от данни са дадени точкови диаграми на разсейването на мощността спрямо всеки един от изследваните фактори. Направен е анализ на резултатите от всяка една точкова диаграма, като е обяснено как влияе всеки един от параметрите поотделно върху потребяваната мощност. На следващата фигура, като пример е представено влиянието на натоварване с руда.



Фиг. III-1. Натоварване с руда (Ore)

На горната фигура е показана зависимостта на потребяваната мощност от натоварването с руда на мелничния агрегат. Това е най-важната зависимост, тъй като преработената руда е основния параметър, който трябва да бъде поддържан възможно най-висок при запазване на изискуемите минимални качества на готовия продукт. Мелницата, както всяко съоръжение има определени от производителя технологични възможности и целта е да се извлече максимума от този високо енергоемък възел. Споменато бе, че натоварването с руда влияе слабо върху потребяваната мощност, но все пак от графиката можем да стигнем до заключението, че при режим на работа с около 175-180 t/h се забелязва слабо повишаване на потребяваната мощност. Увеличената мощност е с около 20 kW, но се увеличава производителността, което от своя страна е предпоставка за намаляване на специфичният разход на електроенергия. По-нататъшното увеличение на натоварването с руда, ще доведе до снижение на мощността на двигателя, но опитът показва, че при натоварване над 180 t/h ще се влоши качеството на готовия продукт.

От самите графики се вижда, че няма ясно изразена тенденция на изменението на мощността в зависимост от отделния фактор, т.е. влиянието на всеки един от факторите поотделно е малко. От формата на облака от точки се вижда, че регресионната крива би била полиномиална. Въз основа на обработените над 1800 данни за всеки параметър са изведени регресионните уравнения и съответно коефициент на детерминация при всяка една от регресионните криви, които са дадени в таблица III-2.

Таблица III-2.

Фактор	Зависимост	R ²
Ore	$y = -0.0189x^3 + 9.657x^2 - 1637.6x + 94278$	R ² = 0.0356
Water mill	$y = 0.3189x^3 - 14.362x^2 + 216.64x + 799.03$	R ² = 0.1051
Water sump	$y = 0.0005x^3 - 0.336x^2 + 70.03x - 2873.6$	R ² = 0.0471
Volume cyclone	$y = -3E-06x^3 + 0.0027x^2 - 0.5959x + 1829.3$	R ² = 0.0182
Density cyclone	$y = 4E-05x^3 - 0.1979x^2 + 307.62x - 157302$	R ² = 0.0449
Pressure cyclone	$y = -5168.4x^3 + 7886.6x^2 - 3680.4x + 2396$	R ² = 0.1171

От резултатите от Табл. III-2 може да се заключи, че от всичките изследвани 6 фактори най-значим по отношение изменение на мощността е Pressure cyclone (съпоставим с Water mill).

Табл. III.3.

N=2257	Regression Summary for Dependent Variable: Power R= 0,53627354 R ² = 0,28758931 Adjusted R ² = 0,28568955 F(6; 2250)=151,38					
	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(2250)	p-value
Intercept			2345,458	42,60373	55,0529	0,000000
Ore	-0,034297	0,020743	-0,337	0,20377	-1,6534	0,098385
Water mill	0,166567	0,019310	4,019	0,46596	8,6262	0,000000
Water sump	-0,110140	0,020233	-0,297	0,05456	-5,4435	0,000000
Volume cyclone	-0,069957	0,021135	-0,068	0,02050	-3,3100	0,000948
Density cyclone	-0,398883	0,021785	-0,368	0,02007	-18,3101	0,000000
Pressure cyclone	0,531653	0,023138	453,183	19,72296	22,9775	0,000000

По интересно е комплексното влияние на горните фактори върху мощността. Данните от Табл. III-1(Измерени параметри от системата) са обработени с помощта на софтуерен продукт STATISTICA. Резултатите от анализа са представени в Табл. III-3.

Полученият коефициент на множествена корелация е 0,53627354, съответно неговият квадрат е 0,28758931, което означава, че само около 28,76% от промените на мощността са в резултат от промените в изследваните фактори. Това говори за умерена зависимост между мощността и съвкупността от факторите в табл. III-2 и III-3. Този факт намира и потвърждение от високата по абсолютна стойност свободен член в уравнение (III-4).

Видът на получената зависимост е:

$$Y = 2345,458 - 0,337X_1 + 4,019X_2 - 0,297X_3 - 0,068X_4 - 0,368X_5 + 453,183X_6, \quad (\text{III-4})$$

където:

- Y – активната мощност;
- $X_1, \dots, X_6$ са съответно Ore, Water mill, Water sump, Volume cyclone, Density cyclone, Pressure cyclone.

По отношение адекватността на модела: единствено при фактор Ore стойността на показателя за доверителна вероятност (p-value) е над критичната 0,05, което означава, че моделът е адекватен с доверителна вероятност над 95% по отношение на останалите фактори (без рудата, при която доверителната вероятност е ниска).

В Табл. III-4 е дадена корелационната матрица на модела.

Таблица III-4

Variable	Correlations of Regression Coefficients b; DV: Power					
	Ore	Water mill	Water sump	Volume cyclone	Density cyclone	Pressure cyclone
Ore	1.000000	-0.263155	-0.261509	-0.008468	-0.030171	-0.284274
Water mill	-0.263155	1.000000	0.059250	0.153020	0.083673	-0.191084
Water sump	-0.261509	0.059250	1.000000	-0.306249	0.323012	0.072835
Volume cyclone	-0.008468	0.153020	-0.306249	1.000000	-0.234807	-0.301754
Density cyclone	-0.030171	0.083673	0.323012	-0.234807	1.000000	-0.357733
Pressure cyclone	-0.284274	-0.191084	0.072835	-0.301754	-0.357733	1.000000

Изводи от трета глава:

1. Като цяло построенят модел, представен чрез III-4 е адекватен.
2. Връзката между активната мощност, консумирана от електродвигателите от една страна и съвкупността от фактори, обуславяща технологичния процес е умерена .
3. Помежду си факторите са слабо зависими, като някъде връзката е правопрпорционална, някъде е обратно пропорционална.
4. Изведени са регресионните уравнения и съответно коефициент на детерминация при всяка една от регресионните криви.

ГЛАВА IV. РАЦИОНАЛЕН ИЗБОР НА ЗАДВИЖВАНЕ

Топковата мелница разрушава постъпилия материал чрез удар, стриване и смачкване под действието на смилащата среда. Работи със смилащи тела под формата на свободно падащи топки, поместени заедно със смилания материал във въртящия се барабан на мелницата. Топките се увличат от въртящия се барабан в резултат на силата на триене и се издигат до определено ниво, от където падат или се свличат надолу. Работата на мелницата се осигурява чрез непрекъснато движение на материала, който постъпва през едната шийка и се разтоварва през другата. Трудно е да се определи точното теоретично потребяваната мощност от мелницата, тъй като условията на работата им в различните предприятия не са еднакви. Проблемите произтичат от пускането и синхронизацията, редът от стандартни номинални мощности на двигателите, като те често работят в нерационални режими. Често се избират електродвигатели със значителен запас по мощност, който може да достигне 20-30%, а понякога и повече. Например за задвижването на мелница МШЦ 4,5х6 се използва синхронен двигател СДС 19-56-40 УХЛ4 с номинална

мощност 2,5 MW, въпреки че консумацията на електроенергия в установен режим на тази мелница е около 1,9÷2MW. Тоест запаса на мощност в задвижването е около 25%, за което се изразходват неоправдани средства, увеличавайки неговата цена, капиталните и експлоатационните разходи.

IV.1. Теоретично определяне на мощността на електродвигателя.

В големите наши миннодобивни предприятия основно се използва мелница тип МШЦ 4,5х6, имаща следните параметри:

- диаметър на барабана: $D_B = 4500 \text{ mm}$
- дебелина на облицовката: $\delta = 190 \text{ mm}$
- честота на въртене на барабана: $n = 16,7 \text{ min}^{-1}$
- дължина на барабана: $L = 6000 \text{ mm}$
- коефициент на запълване с мелещи тела: $\varphi = 0,35$
- маса на барабана: $M_B = 220 \text{ т}$
- коефициент на триене в лагерите: $\mu = 0,008$
- диаметър на шийката на лагерите на мелницата: $d = 1,9 \text{ m}$

Основните конструктивни параметри, необходими при проектиране на такова съоръжение са както следва:

1. Светъл диаметър на барабана:

$$D_1 = D_B - 2\delta = 4500 - 2 \cdot 190 = 4120 \text{ mm} \quad (\text{IV-1})$$

където:

D_B – диаметър на барабана

δ – дебелина на облицовката

2. Критичната ъглова скорост на барабана - това е тази скорост, при която най-външният слой от топки започва да се движи заедно с него. Условно критичната честота на въртене на барабана на мелницата съответства на такава честота на въртене, при която центробежната сила на въртеливото движение на мелещото тяло с център на тежестта намиращ се на вътрешната повърхност на барабана е равна на силата на тежестта на това тяло. В този случай мелещото тяло е с безкрайно малки размери, повдигнато е в най-горната точка на барабана, не се отделя от повърхността на барабана, а се върти заедно с нея. Определя се съгласно формулата:

$$\omega_{kp} = \sqrt{\frac{2 \cdot g}{D_1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81}{4,1}} = 2,18 \text{ rad/s} \quad (\text{IV-2})$$

където:

$D_{1,m}$ - светъл диаметър на барабана.

Той се определя по формулата:

$$D_1 = D_\delta - 2\delta, m$$

където:

D_δ, m е вътрешният диаметър на барабана;

δ, m - дебелина на облицовката.

3. Действителна ъглова скорост на барабана може да бъде определена съгласно израза:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 16,7}{30} = 1,74 \text{ rad/s} \quad (\text{IV-3})$$

където:

$n = 16,7 \text{ min}^{-1}$ – честота на въртене на барабана.

4. Работен обем на мелницата:

$$V_1 = \pi \cdot R_1^2 \cdot L = 3,14 \cdot 2,06^2 \cdot 6 = 79,94 \text{ m}^3 \quad (\text{IV-5})$$

5. Плътност на топките – различна е в зависимост от диаметъра им, стойностите на най-често използваните размери са дадени в табличен вид

6. Мощност на празен ход представлява мощността, която се изразходва за преодоляване на енергийните загуби от триене в лагерите на мелницата, породени от теглото на барабана. Тази мощност може да бъде пресметната по формулата:

$$M_{\text{п.х.}} = 0,5 \cdot \mu \cdot G_B \cdot \omega \cdot d = 0,5 \cdot 0,008 \cdot 2158 \cdot 10^3 \cdot 1,74 \cdot 1,9 = 28537 \text{ W} \quad (\text{IV-9})$$

7. Мощност за издигане на топките - определя се от израза:

$$N_G = \rho_T \cdot g \cdot L \cdot \omega_{KP} \cdot \psi^3 \cdot R_1^3 \cdot \left[(1 - K_2^4) - \frac{2}{3} \cdot \psi^4 (1 - K_2^6) \right] = 4600 \cdot 9 \cdot 81 \cdot 6 \cdot 1,74 \cdot 0,79 \cdot 2,06^3 \left[(1 - 0,606^4) - \frac{2}{3} \cdot 0,79^4 (1 - 0,606^6) \right] = 1654885,6 \text{ W} \quad (\text{IV-11})$$

При така изчислената теоретично мощност, може да бъде избран както двигател с мощност 2,0 MW, така и предложения като окомплектовка към мелницата от производителя - с мощност 2,5 MW.

Известни резултати от предварителните оценки са възможните решения на задачата по понижаване мощността на задвижването. При това са приети различни възможни допуски, в това число не се отчита изменението на активното съпротивление на намотката и разрядното съпротивление във веригата на възбуждането, вследствие на тяхното нагряване по време на пуск. Не се отчита и последващите изменения в разчетните данни на последните модели двигатели, вследствие използването при изработката им на нови материали, изменение в конструкцията и избора на режим за използване. При това, като пример е разгледана възможността да се използва за задвижване с електродвигател СДС 19-46-40 УХЛ4 с мощност 2 MW, мелница МШЦ 4,5×6, вместо използвания преди това двигател СДС 19-56-40 УХЛ4 с мощност 2,5 MW.

IV.2. Загуби в двигателите

През време на работата на електрическата машина, в нея възникват загуби на мощност и енергия, които могат да се класифицират по следния начин:

1. Загуби в стоманата на статора и ротора от хистерезис и вихрови токове, породени от изменението на основното магнитно поле. Към тях се отнасят също повърхностните и пулсационни загуби, обусловени от наличието на зъбци и канали в статора и ротора.
2. Механични загуби от триенето в лагерите, четките с колектора или контактните пръстени, на триенето на въртящите се части на машината с въздуха; към тях се отнасят също загубите на енергия, изразходвани за въртенето на вентилатора, монтиран на вала на машината.
3. Електрически загуби в намотките и в преходните контакти на четките с колектора или с контактните пръстени.
4. Добавъчни загуби при товар, равни на разликата от пълните загуби в машината при това и всички по-горе изброени; в машините за променлив ток те се обуславят главно от променливото магнитно поле на разсейването; в постояннотоковите машини – от изкривяването на полето вследствие реакцията на котвата и полето на комутиращите секции.

Първите два вида загуби съставляват загубите при празен ход. Те се наричат така, защото се определят при опитни изследвания от данните на опита при празен ход. Тези загуби за повечето машини, работещи с постоянно напрежение на изводите на котвата и с постоянна скорост на въртене, малко се изменят при преминаване от празен ход към номинален товар.

Останалите два вида загуби възникват при товар и затова те се наричат загуби при товар.

В синхронните машини тези загуби се определят при опитни изследвания по данните от опита на късо съединение, вследствие на което те се наричат също загуби на късо съединение.

Загубите се равняват на изразходваната в тях мощност.

IV.2.1. Загуби в стоманата

Загубите от хистерезис и вихрови токове зависят от вида на употребената в машината листов електротехническа стомана. Качеството на стоманата се определя чрез специфичните загуби ($P_{10/50}$), под които се разбират загубите от хистерезис и вихрови токове в 1 kg стомана при честота 50 Hz и

синусоидално изменение на индукцията по време, имаща амплитуда от 10 000 G (табл. IV-3).

Таблица IV-3. Стойности за $p_{10/50}$

Марка електротехническа стомана	Дебелина на листа, мм	$P_{10/50}$
Э1А	0.5	3.3
Э1АА	0.5	2.87
Э2	0.5	2.64
Э4А	0.5	1.42
Э4АА	0.35	1.2

Приема се, че специфичните загуби в стоманата за различни честоти (при $f = 10 \div 100$ Hz) и индукции са приблизително равни на:

$$p_c = p_{\frac{10}{50}} \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} \left(\frac{w}{kg} \right) \quad (IV-14)$$

А) Основни загуби в стоманата на статорния или роторния ярем

Б) Основни загуби в стоманата на зъбите

В) Повърхностни загуби

Г) Пулсационни загуби

Д) Пълни загуби в стоманата при празен ход

В зависимост от типа на машината изчислителните формули за определяне на пълните загуби в стоманата при празен ход приемат следния вид за синхронните машини:

$$P_c = P_{c(s)} + P_{c(z)} + P_{\text{пов}} \quad (kW) \quad (IV-25)$$

където:

$P_{c(s)}$ са загубите в стоманата на ярема на статора;

$P_{c(z)}$ - загубите в зъбите на статора;

$P_{\text{пов}}$ - повърхностните загуби в полюсните крайници.

Използвайки израза (IV-25) за двигател СДС-19-56-40УХЛ4 пълните загуби в стоманата му ще бъдат:

$$P_c = P_{c(s)} + P_{c(z)} + P_{\text{пов}} = 21,87 + 6 = 27,87 \quad (kW) ,$$

а за двигател СДС-19-46-40УХЛ4 ще бъдат:

$$P_c = P_{c(s)} + P_{c(z)} + P_{\text{пов}} = 18,22 + 5 = 23,22 \quad (kW)$$

IV.2.2. Механически загуби

Механическите загуби или загубите от триене зависят от налягането на повърхността на триенето, от коефициента на триене и от относителната скорост на преместване на триещите се повърхности. Точното изчисление на загубите от триене в повечето случаи среща трудности при определяне

коэффициента на триенето, който зависи от качеството на триещите се повърхности (степената на шлифовката), от вида на смазващото масло и неговата температура.

Затова в заводите обикновено се използват опитни данни, получени при изпитванията на построени машини, като употребяваните изчислителни формули са в основата си емпирически. Още по-големи трудности се срещат при определянето на вентилационните загуби в електрическите машини. Тези загуби се определят почти изключително чрез опити.

А) Загуби в лагерите

Б) Вентилационни загуби

В) Общи загуби на триене в лагерите и вентилационни загуби

Г) Загуби от триене на четките с колектора и контактните пръстени

IV.2.3. Електрически загуби

А) Загуби в намотките

Съгласно закона на Ленц – Джаул електрическите загуби са равни на:

$$P_{\text{ел}} = \Sigma I_x^2 \cdot r_{x75} \cdot 10^{-3} \text{ (kW)} \quad (\text{IV-31})$$

където I_x е токът в намотката x ; r_{x75} – съпротивлението на намотката в Ω , приведено към стандартната температура 75° .

Ако токът в отделните намотки е един и същ и съпротивленията на намотката са еднакви, то при m -намотки електрическите загуби съставляват:

$$P_{\text{ел}} = m \cdot I^2 \cdot r_{75} \cdot 10^{-3} \text{ (kW)} \quad (\text{IV-32})$$

Съгласно израза (IV-32) за двигател СДС-19-56-40УХЛ4 електрическите загуби в намотките са:

$$P_{\text{ел}} = m \cdot I^2 \cdot r_{75} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 200 \cdot 0,122 = 73,2 \text{ (kW)}$$

а за двигател СДС-19-46-40УХЛ4 те ще бъдат:

$$P_{\text{ел}} = m \cdot I^2 \cdot r_{75} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 200 \cdot 0,103 = 61,8 \text{ (kW)}$$

Б) Електрически загуби в преходните контакти на четките

IV.2.4. Добавъчни загуби

Основната причина за възникването на добавъчните загуби са разсейващите се полета, затварящи се както около проводниците, положени в каналите, така и около проводниците, образуващи челните части на намотките. Тези полета индукират вихрови токове в медта на намотките и във всички близколежащи металически масивни части на машината. Голяма роля играят също полетата на висшите хармоници на статора и ротора. Действието на основните вълни на статора и ротора, създаващи главния поток на машината, се взема под внимание в основните загуби в стоманата. Полетата на висшите хармоници, движещи се с различни скорости относно статора и ротора,

индуктират в стоманата и в късо съединените намотки токове, които предизвикват добавъчни загуби.

При точното изчисление на добавъчните загуби се срещат големи трудности.

Добавъчните загуби в синхронните машини, причинени от тока при товар, са приблизително равни на добавъчните загуби при късо съединение. Затова те се наричат също добавъчни загуби на късо съединение.

Таблица IV-6. Загуби в двигателите

	Загуби в стоманата, kW	Електрически загуби, kW	Добавъчни загуби, kW	Пълни загуби, kW
СДС-19-56-40УХЛ4	27,87	73,2	10	111,07
СДС-19-46-40УХЛ4	23,22	61,8	8	93,02

Използвайки изразите IV-1 ÷ IV-39 , са определени загубите при двата предложени двигателя, като са систематизирани в табл. IV-6.

Изводи:

1. Теоретично са направени изчисления за мощностите необходими за преодоляване на основните механически загуби на барабанна топкова мелница тип МШЦ 4,5 х 6, която е основен мелничен агрегат използван в големите минно-преработващи предприятия в България.
2. Определени са основните електрическите загуби в използвания електродвигател служещ за електрозадвижване на мелницата.
3. На база на направените изчисления е направен извода, че използвания като стандартна окомплектовка електродвигател е с по-голяма мощност от необходимата. Препоръчано е съответно да бъде избран подходящ такъв. След направени изчисления е стигнато е до извода, че използването на електродвигател с по-малка мощност ще доведе до значителни икономии на електроенергия.

ГЛАВА V. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

За да бъде извършен анализът в глава III, бе необходимо да се провери достоверността на данните, записани в информационно-управляващата система на предприятието.

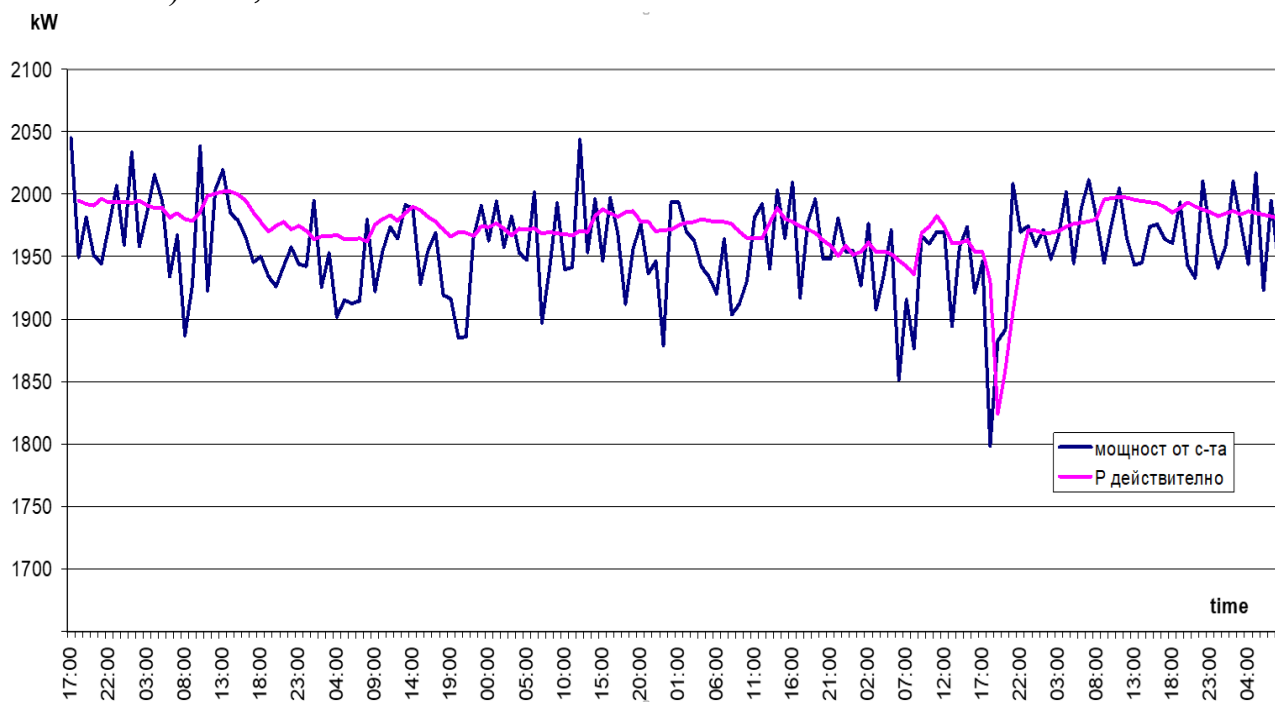
За определяне на грешката при измерване на тока и активната мощност от работещата информационно-управляващата система (SCADA) бяха

проведени паралелни измервания на мелнични агрегати с прецизни мрежови анализатори FLUKE 437-II и FLUKE 435-II. С цел елиминиране на грешката от токовите трансформатори амперклемите на анализаторите бяха прикачени директно към кабелите 6 kV, захранващи синхронните двигатели на мелниците. Анализаторите сканират електрическите величини със скорост 200 kS/s и осредняват данните за зададен времеви интервал от 1 min.

V.1. Проверка на измерените стойности на мощността на барабанните мелници.

V.1.1. Обработка на резултатите за часовите стойности на тока и активната мощност.

Грешката при измерване на мощността е в двете посоки – положителна и отрицателна. Максималната относителна положителна грешка за часовите стойности е +5,23%, а максималната отрицателна грешка е –6,67%. Осреднена стойност на грешката за седем дневния период (положителни + отрицателни стойности) е –0,87%.

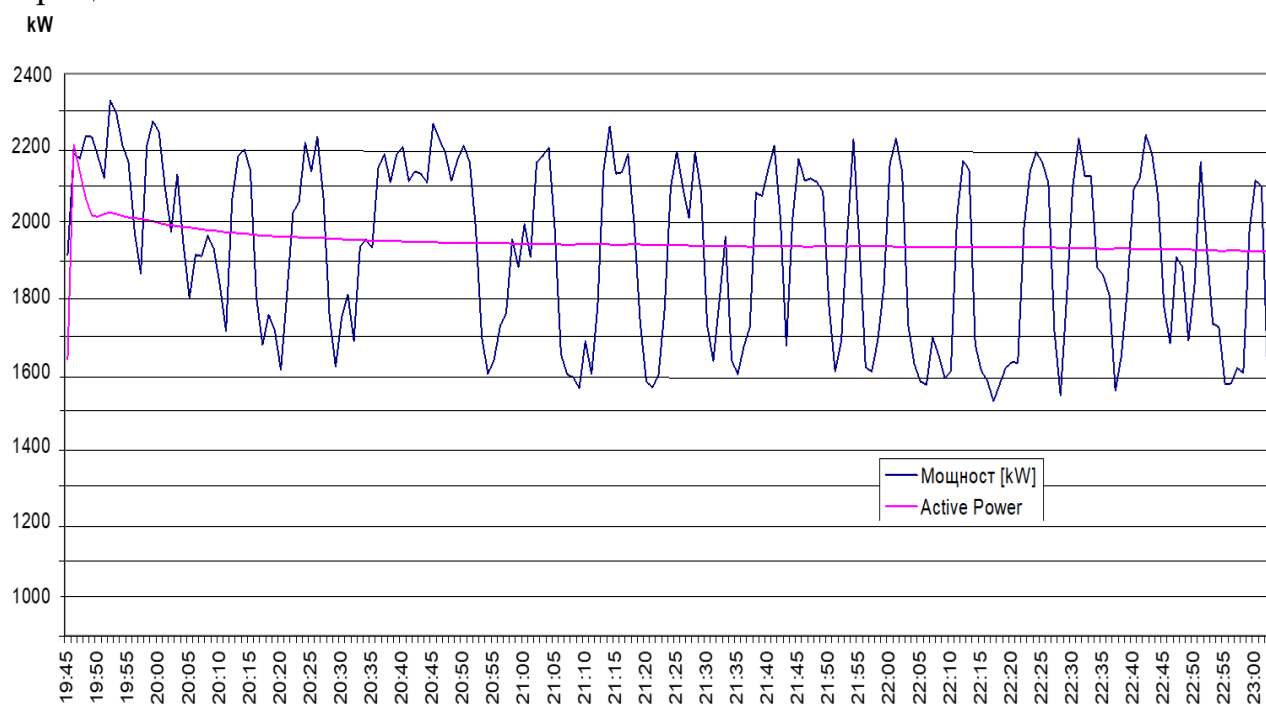


Фиг. V-2. Часова мощност, отчетена от системата и действителна – МА1

На фиг. V-2 е показано изменението на часовите мощности за 7 дневен период. Вижда се по-голямата динамика в кривата на часовата мощност в сравнение с измерената от анализатора. Отклоненията са в положителна и отрицателна посока, но в общи линии следват кривата регистрирана от анализатора.

V.1.2. Обработка на резултатите за минутните стойности на тока и активната мощност

Изменението на осреднените за 1 мин. стойности на активната мощност, регистрирана от системата (синя линия) и от анализатора (червена линия) в продължение 3ч. и 15 мин. са дадени на фиг. V-8. Вижда се голямото отклонение на минутните стойности регистрирани от системата от тези на анализатора, достигащи до 200-300 kW. Освен това мощностите от анализатора след пусковия процес са с незначителни колебания, докато мощностите от системата са със значителни флуктуации в положителна и в отрицателна посока.



Фиг. V-8. Активна мощност – МА1

V.2. Експериментални изследвания на консумираната от мелниците активна и генерирана реактивна мощност с отчитане на технологичните параметри

Както бе казано в глава II, специфичният разход на електроенергия за смилане в топкови мелници е тясно свързан с технологичния процес и зависи от редица фактори: теглото на топковия товар, размера на мелницата, скоростта на въртене, плътността на пулпа, едрината на изходния материал, типа на футеровката, физико-механичните свойства на рудата, производителността на мелниците, и др. От експериментални изследвания е установено, че основната мощност в топковата мелница се изразходва за повдигане на топковия товар - около 80%. Увеличаването на натоварването с

руда на мелницата води до незначително увеличаване на консумираната мощност. Очевиден е стремежът за повишаване на производителността на мелниците, което ще доведе до намаляване на специфичният разход на електроенергия.

Производителността на мелницата зависи и от правилния избор на топковия товар. Както повишаването, така и занижаването на топковия товар водят до намаляване производителността на мелницата, а оттам и до увеличаване на специфичния разход на електроенергия. Върху производителността на мелницата влияе и размерът на смилащите тела (топки). Специфичният разход на електроенергия при процеса смилане на рудата може да се определи най-точно по енергийните характеристики.

Таблица V-3

Задвижващи ел. двигатели	P _н /kW/	U _н статор /kV/	U _н ротор /V/	I _н статор /A/	I _н ротор /A/	cos φ _{ном}	η _{ном} %	n _{ном} / rpm /
СДС 19-56-40 УХЛ4	2500	6,0	162	281	225	0,9 кап	95,0	150
СДС 19-56-40 У4	2500	6,0	145	281	278	0,9 кап	94,8	150

В таблица V-3 са дадени основните електрически параметри на използваните синхронни електродвигатели.

- пускане – асинхронно, като при достигане на под синхронни обороти в ротора се подава постоянен ток, с цел влизане в синхронизъм.
- възбуждане – тиристорен възбудител, тип ТЕ8 – 320 и Аникрон ТМ02.

Предаването на въртящия момент от двигателя към мелницата се осъществява с помощта на:

- междинен (водещ) вал, вал – зъбно колело ($Z = 35$, $m=20$);
- зъбен венец ($Z=316$, $m=20$).

Характерна особеност на задвижването на барабанните мелници е голямата предавателна степен на зъбната предавка. Освен това зъбната предавка работи в тежък динамичен режим, характеризиращ се с високи специфични натоварвания на зъбите на контактна якост на огъване. Налице е и ярко изразена динамика, пораждаща вибрации, причина за които е водопадният скоростен режим на работа при барабанните мелници.

Друга характерна особеност на условията за работа на зъбната предавка е осигуряване на непрекъснато мазане на зъбната двойка. Мазането с консистентни смазки е периодично. Като се има предвид и замърсената с прах

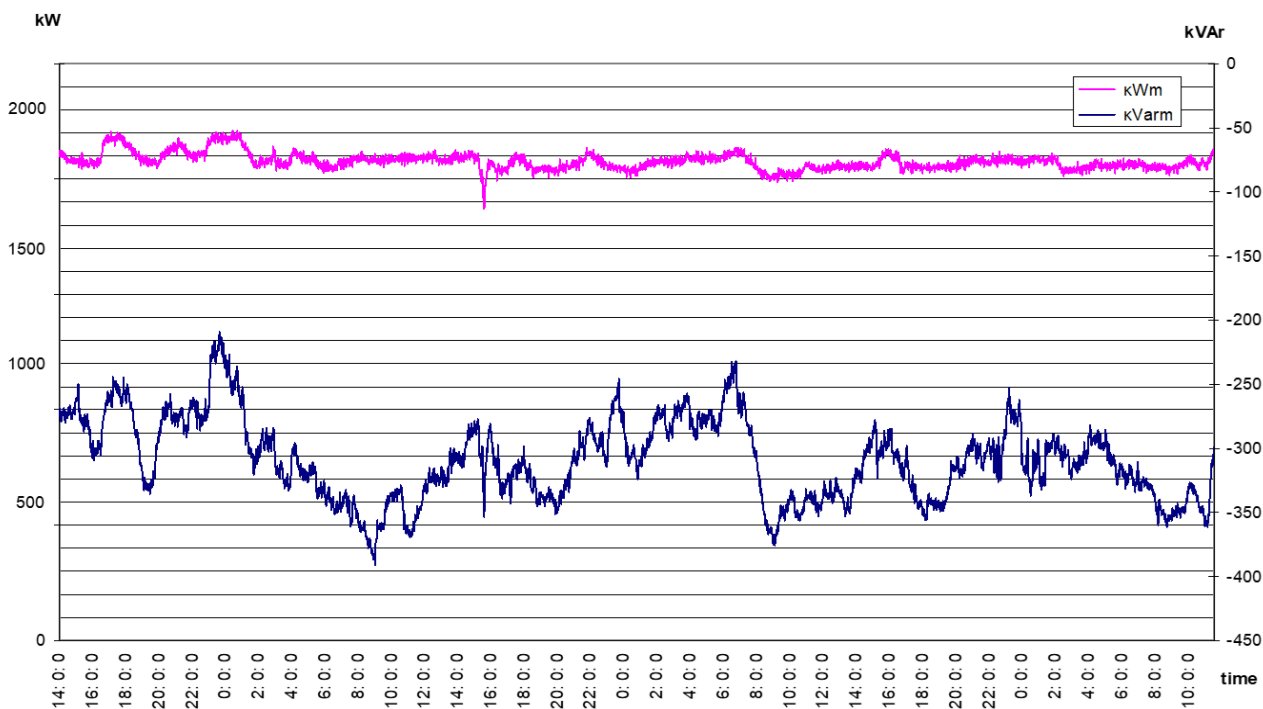
атмосфера стават очевидни тежките условия, при които работи тази зъбна предавка, което е причина за интензивното износване на зъбите на зъбния венец. Това води до намаляване на механичния КПД на задвижването, следствие нарушаване на еволвентния профил на зъбите. Сnižаването на механичния КПД на мелница тип МШЦ 4,5 х 6 само с 2 % води до енергийни загуби в рамките на едно денонощие, възлизаци на 960 kWh (при средна мощност 1960 kW). Ето защо е необходимо да се спазват предвидените в техническата документация срокове за техническо обслужване и да не се допуска работа на мелници с износени зъби на предавката повече от допустимото.

V.2.1. Изследване влиянието на натоварването по руда при постоянен топков товар върху енергийните характеристики

V2.2. Изследване работата на мелницата в зависимост от топковия товар

За да бъде определен разходът на топки е направен експеримент с една мелница. В началото мелницата бе заредена с 4 тона топков товар. В 13 часа същия ден мелницата бе спряна за свързване на измервателния уред и беше измерено количеството на топките. Отчетени бяха следните размери $D_1=421\text{mm}$ и височина от топките до горния край на цилиндъра $h=249\text{mm}$, което съответства на запълване на мелницата с топков товар 38,4%. Около 16 ч мелницата е заредена допълнително с 4 тона топки. От този момент до следващото спиране на мелницата, топки не са зареждани. Измерени са размери $D_1=421\text{mm}$ и $h=258\text{mm}$, което съответства на 35,8% запълване на мелницата с топки. Ако приемем правилото, че номиналното запълване с топки е 38% , на което съответства топков товар 140 тона, последното измерване показва недостиг на топков товар от 8,14 тона. За целия период на работа от 69 часа, мелницата е изразходила 13,94 тона топки, което е около 0,2 тона на час.

Важно е да се отбележи, че за целия период на измерване гранулометричния състав на изходния продукт от мелницата е бил в необходимите граници.

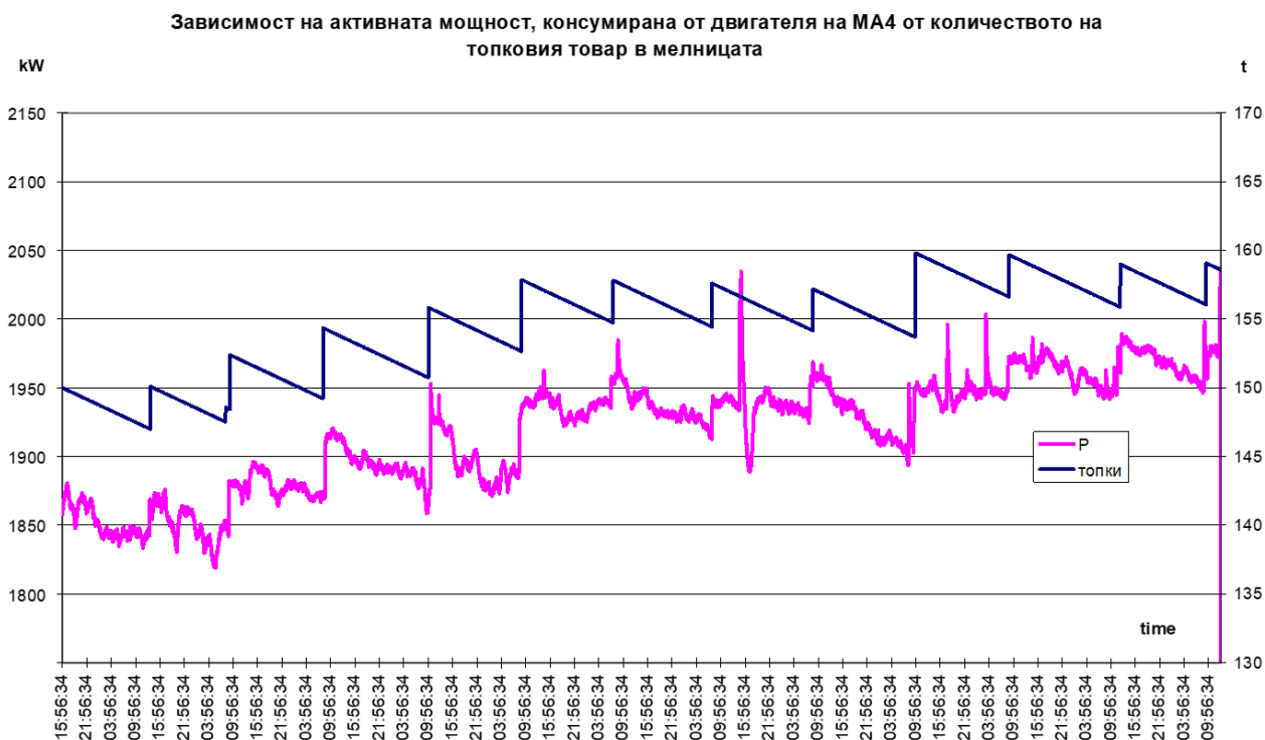


Фиг. V-16. Активна и реактивна мощност

На фиг. V-16 е даден запис за целия период на измерване (69 часа) на активната и реактивната мощност, черпена от електродвигателя. Максималната регистрирана моментна мощност е $P_{\max}=1920$ kW, минималната $P_{\min}=1810$ kW, средната за целия период $P_{\text{av}}=1890$ kW. Генерираната реактивна мощност се изменя в границите от -209 kVAr до -391 kVAr със средна стойност -309 kVAr.

V.2.2.1. Ниво и режим на работа на топковия товар

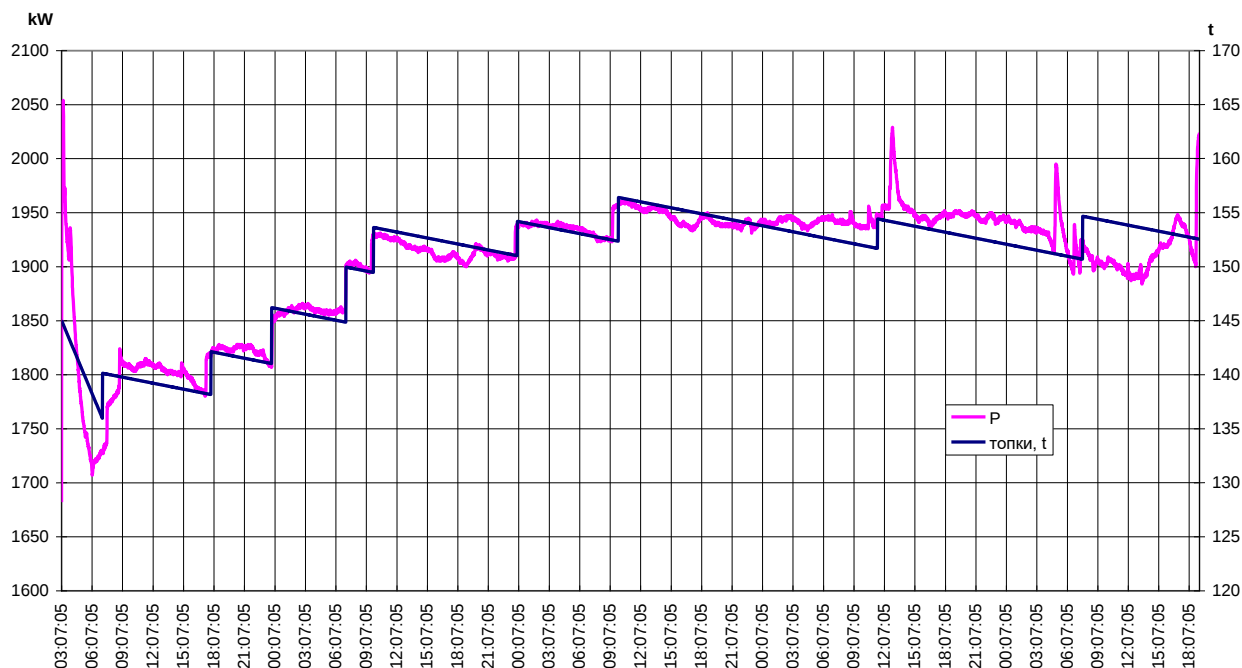
От правилния избор на топковия товар зависи производителността на мелницата и следователно специфичния разход на електроенергия. Както завишения, така и занижения топков товар води до намаляване на производителността на мелницата, което предизвиква повишаване на специфичния разход на електроенергия. При оптимален топков товар на мелницата, работеща в затворен цикъл, може да се допусне повишение на циркулационния товар при едновременно увеличение на производителността, снижавайки специфичния разход на електроенергия и подобрявайки технологичните показатели.



Фиг. V-17 Активна мощност и топков товар в мелницата

На фиг. V-17 са показани кривите, характеризиращи зависимостта между големината на топковия товар и консумираната мощност от електродвигателя на мелница МА4 за период от дванадесет дни.

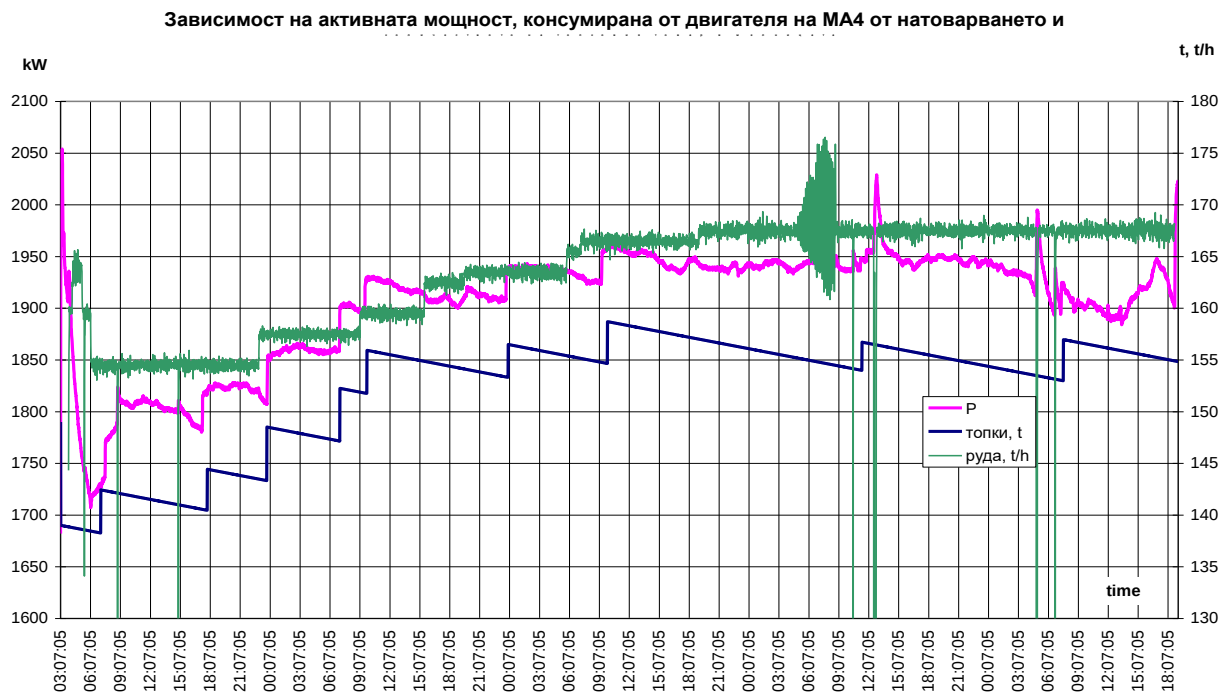
Данните за часа и количество на топковия товар за построяване на кривата са взети от системата SCADA. Като са отчетени резултатите от измерванията на топковия товар и часовата разходна норма на топки, определена по-горе, е построена зависимостта за изменение на топковия товар в мелницата в продължение на 4 дневен период. За същия период са нанесени данните за консумираната от електродвигателя на мелницата активна мощност, записана от мрежовия анализатор FLUKE. От кривите на фиг. V-17 се вижда, че при всяко зареждане с топки следва рязко повишаване на активната мощност. Увеличението на активната мощност е с около 9 kW на тон топки. По време на работа топките се износват, топковия товар намалява и консумираната от електродвигателя активна мощност намалява.



Фиг. V-18. Активна мощност и топков товар в мелницата след смяна на облицовка

На фиг. V-18 са показани кривите на активната мощност и топковия товар при пускане в работа на мелница след смяна на облицовката.

В началото се вижда бързо намаляване на активната мощност на двигателя, следствие на запълването на облицовката на мелницата с топки. Виждат се и по-кратките интервали от време за зареждане с топков товар в началния период, с цел увеличение на ефективно участващите в смилането топки. Следва период на установен топков товар, около 155 t (прието при 4514 kg/m^3). При последното показано зареждане с топки очевидно топковия товар е надвишил оптималния (т.3 от фиг. V-13) и се забелязва намаляване на мощността. При него поради приближаване на центъра на тежестта към оста на барабана на мелницата намалява активната мощност, а топките преминават в смесен скоростен режим с частично претъркуване и с частичен полет на смилащите тела. След това поради износването на топките мощността постепенно нараства. От този експеримент може да се определят оптималния топков товар и съответната активна мощност. За този мелничен агрегат, който е с нова облицовка оптималния топков товар е 155 t, и съответната активна мощност 1950 kW.



**Фиг. V-19 Консумирана мощност, в зависимост от натоварване по руда и
топков товар**

На фиг. V-19 е нанесена кривата, показваща натоварването по руда. Вижда се, че в установените режими натоварването по руда в мелницата е постоянно и следователно няма да влияе на предложения режим на управление на топковия товар.

V.2.2.2. Ъглова скорост на барабана

Синхронните двигатели, използвани за задвижване на топковите мелници, се характеризират с абсолютно твърда механична характеристика, т.е. оборотите на електродвигателя не зависят от големината на товара. При описаната по-горе предавка номиналната честота на въртене на барабана е 16,6 грт. В случая е използван начин да се промени скоростта на въртене на барабана, като се промени броят на зъбите на водещото зъбно колело. Такъв експеримент е направен с 4 броя мелници тип МШЦ 4,5 х 6,0 в едно от изследваните предприятия, като броя на зъбите на водещото зъбно колело от 35 е намален на 33 броя. По този начин е намалена честотата на въртене на барабана на мелницата на 15,73 грт. Основание за тази промяна е очакването, че с намаляване на оборотите ще спадне разхода на електроенергия и на топки, както и, че ще се намали износването на футеровката.

Резултатите от проведените изследвания не дават основание за категорично твърдение за реализиран положителен ефект от направената промяна.

Същината на проблема се състои не в абсолютната ъглова скорост, с която се върти барабана, а в относителната ъглова скорост.

Действителната ъглова скорост на мелницата се отличава от критичната. Тя зависи от много фактори, като режима на работа на мелницата, вида на облицовката на барабана, количеството на топките, плътността на пулпа, характера на смилания материал и др.

Важен показател, характеризиращ работата на барабанната топова мелница е параметърът ϕ , дефиниран като коефициент на напълване на мелницата с топки и представляващ отношението на обема на топките в мелницата към обема на барабана на мелницата. Често в практиката ϕ се измерва в проценти.

При работа на мелницата топките, които се движат заедно с барабана се подреждат в слоеве, разположени на различно разстояние от оста на въртене. Ефективната работа на топовата мелница зависи до голяма степен от характера на движение на смилащата среда.

При определена относителна скорост и определен коефициент на запълване на мелницата с топки мелницата работи в така наречения водопаден режим на работа. При този режим топките от всички слоеве, издигайки се заедно с барабана се откъсват от него и преминават в свободен полет. Смилането на материала при този режим става главно чрез удар и отчасти чрез стриване.

При водопаден режим полезната мощност N_0 се образува от мощността за издигане на смилащата среда N_g и мощността за предаване на кинетична енергия на смилащата среда N_e . Пресмятането на полезната мощност, изразходвана от мелницата за смилане на материала става по формули, които включват основни конструктивни и технологични параметри на мелницата. Определящ параметър в тези зависимости е така наречения относителен радиус, който зависи от коефициента на запълване на мелницата с топки и относителната ъглова скорост.

Специфичният разход на електроенергия зависи и от топовия товар. Търсенето в реално време и поддържането на оптимален топов товар при конкретните технологични условия ще доведе до намаляване на специфичния разход на електроенергия.

V.2.2.3. Размер на мелещите тела

При непрекъснатата работа на мелницата топките в нея се износват и тяхното количество намалява. В резултат на това се изменят разхода на електроенергия и производителността на мелницата. За да се поддържа постоянен коефициент на запълване на мелницата с топов товар, в нея постоянно се добавят нови топки.

Износването на топките се изразява в намаляване на диаметъра и формата им под абразивното въздействие на смиланата руда. В резултат на този процес топките в мелницата биват с различна едрина, като зърнометричния състав на топовия пълнеж оказва голямо влияние на върху работата на мелницата.

V.3. Определяне на специфичните загуби на мощност в статора и ротора на синхронните електродвигатели за генериране на реактивна мощност. Построяване на U-образните характеристики

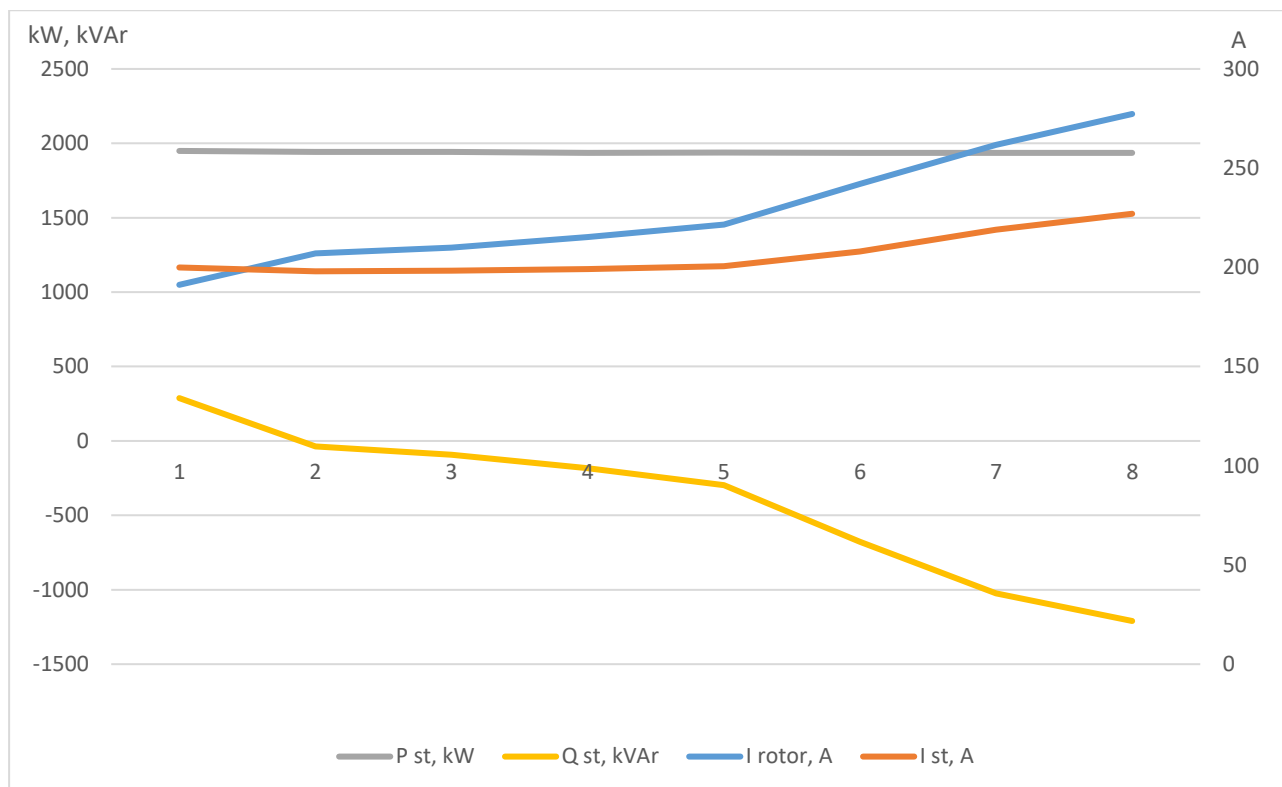
V.3.1. Синхронни електродвигатели тип СДС 19-56-40УХЛ4

На фиг. V-22 е показано изменението на активната и реактивната мощност, както и токът в статора и ротора, заснети от експерименталните изследвания на мелница. От показаните зависимости се вижда, че при изменение на възбудителния ток ($I_{\text{ротор}}$) се изменят значително реактивната мощност (Q) и тока в статора ($I_{\text{ст}}$), но активната мощност (P) остава почти постоянна. Следователно, определянето на активните загуби в статорната намотка на електродвигателя не трябва да става чрез отчитане на консумираната активна мощност при промяна на възбудителния ток. Загубите се изчисляват като се отчете изменението на тока в статорната намотка за определени стойности на възбудителния ток и активните загуби се пресметнат по формулата:

$$\Delta P = 3 \cdot I_{\text{ст}}^2 \cdot R_{\text{ст}} \cdot 10^3, kW \quad (V-2)$$

Където: $I_{\text{ст}}$, - ток в статорната намотка на синхронния електродвигател, А;

$R_{\text{ст}}$ - активно съпротивление на статорната намотка на синхронния електродвигател, Ω .



Фиг. V-22 Активна, реактивна мощност и ток в статора и ротора

За определяне на загубите в роторната верига се измерва трифазно активната мощност на страна $\sim 380V$ на трансформатора, захранващ тиристорния възбудител за различни стойности на възбудителния ток. Така се отчитат загубите в захранващия трансформатор на изправителя, загубите в самия изправител и загубите в роторната намотка.

В таблица V-7 са дадени резултатите от измерванията на мелничен агрегат с условен номер МА1. За всяка стойност на възбудителния ток I_b са регистрирани тока в статора I_{st} , активната мощност P и реактивната Q в статора на синхронния електродвигател. Знакът “-“ пред реактивната мощност означава, че синхронната машина генерира реактивна мощност с капацитивен характер, а положителните стойности на Q означават консумация на реактивна мощност с индуктивен характер.

Таблица V-7. Специфични загуби на активна мощност за генериране на реактивна мощност в синхронен двигател тип СДС 19-56-40У4 (МА1)

I rotor, A	I st, A	P rotor, kW	P ~380, kW	P st, kW	Q st, kVAr	Загуби за възбуждане, kW/kVAr	Загуби в ротора, kW/kVAr	Загуби в статора, kW/kVAr	Пълни загуби, kW/kVAr
191,2	200,0	18,3	23,3	1949	288				
207,1	198,0	20,6	27,3	1942	-37				
210,0	198,3	21,0	27,5	1943	-92				
215,3	199,1	21,8	28,6	1937	-183	0,0092	0,0085	0,0012	0,0104
221,6	200,6	22,8	30,8	1939	-298	0,0134	0,0086	0,0016	0,0150
242,0	208,0	26,5	36,6	1936	-677	0,0145	0,0092	0,0026	0,0171
261,8	219,0	30,2	42,8	1936	-1025	0,0157	0,0098	0,0036	0,0193
277,3	227,0	33,3	46,8	1937	-1210	0,0166	0,0108	0,0042	0,0208

Регистрирана е и трифазната активна мощност ($P \sim 380$) на съгласувания трансформатор (ТСЗВ 100) към тиристорния възбудител. В таблицата е дадено и изменението на мощността в постояннотоковата верига в ротора (P rotor).

Определени са специфичните загуби на активна мощност за генериране на реактивна (kW/kVAr) общо за веригите на възбуждането, в статорната намотка и пълните специфични загуби. Например, при възбудителен ток 221,6 А, тока в статорната намотка е 200,6 А, мощността в роторната намотка е 22,8 kW, а черпената мощност от съгласувания трансформатор на страна 380 V е 30,8 kW. Синхронният двигател е натоварен с активна мощност 1939 kW и генерира капацитивна мощност 298 kVAr. При тези условия пълните специфични активни загуби за генериране на реактивна мощност са 0,015 kW/kVAr, разпределени както следва: в статорната намотка – 0,0016 kW/kVAr, във възбуждането – 0,0134kW/kVAr.

По данните за големината на тока в статора и ротора (табл. V-7) са построени U – образните характеристики на синхронния електродвигател на мелничния агрегат. Преди провеждане на експеримента са отчетени стойности на възбудителния ток $I_v=210A$, токът в статора $I_{st}=198,3A$, консумирана активна мощност $P=1943\text{ kW}$, генерирана капацитивна реактивна мощност $Q=-92\text{ kVAr}$. Чрез стъпково изменение на стойностите на възбудителния ток е снета U-образната характеристика на синхронния двигател, задвижващ мелничния агрегат, при коефициент на натоварване по активна мощност $K_n = 0,8$. На фиг. V-23 е показана построената по данните от експеримента U-

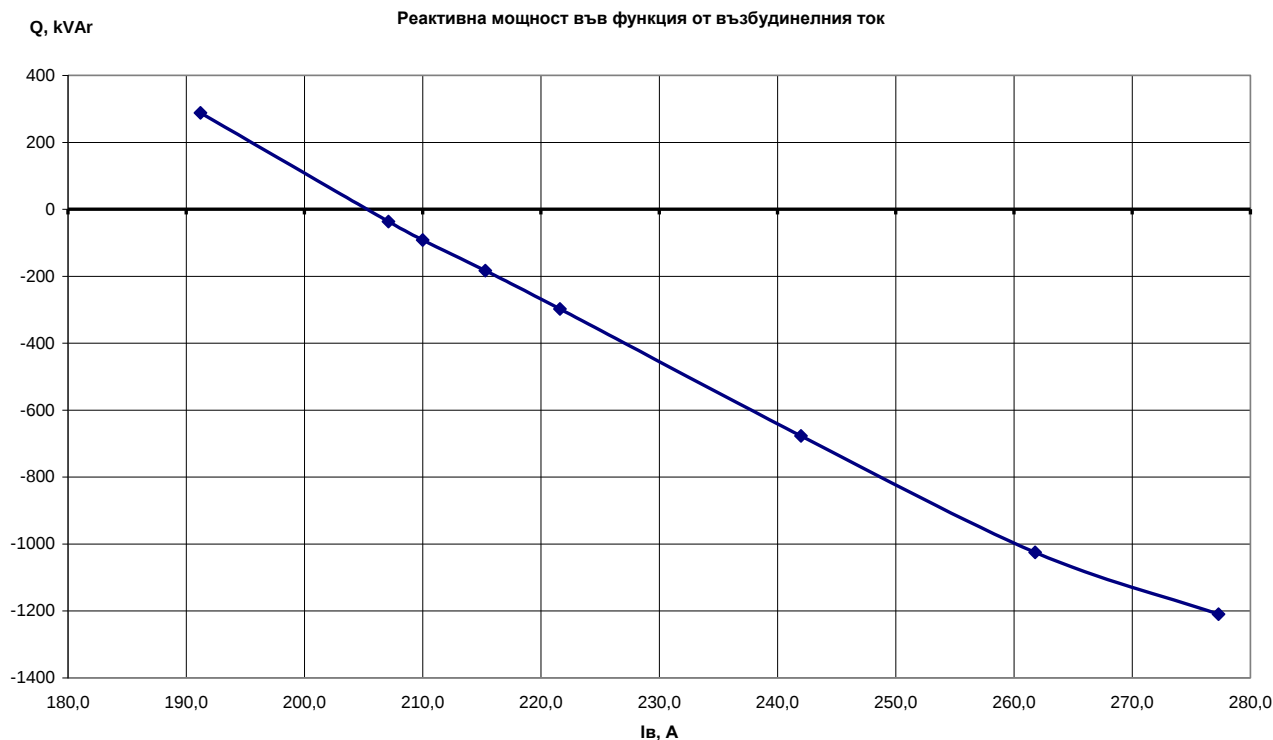
образна характеристика на синхронен двигател СДС -19-56-40У4, задвижващ топковата мелница.

При коефициент на натоварване по активна мощност $K_n = 0,8$ режим на работа на синхронния двигател с $\cos \varphi = 1,0$ се постига при възбудителен ток $I_b = 207$ А. Както е известно това е най-икономичния режим на работа на синхронния електродвигател. Режимът на работа при $\cos \varphi = 1,0$ е устойчив и напълно допустим от технологична и експлоатационна гледна точка.



Фиг. V-23 U-образна характеристика

На база на проведените експериментални изследвания е построена показаната на фиг. V-24 крива, даваща зависимостта на реактивната мощност от тока на възбуждане на синхронния електродвигател СДС-19-56-40 У4 при коефициент на натоварване по активна мощност $K = 0,8$. Тъй като това е преобладаващия коефициент на натоварване на мелничните агрегати в изследваните предприятия, то с достатъчна точност приложената зависимост може да служи за ориентир при определяне на необходимата реактивна мощност и за реализиране на предписания за обогатителната фабрика фактор на мощността.

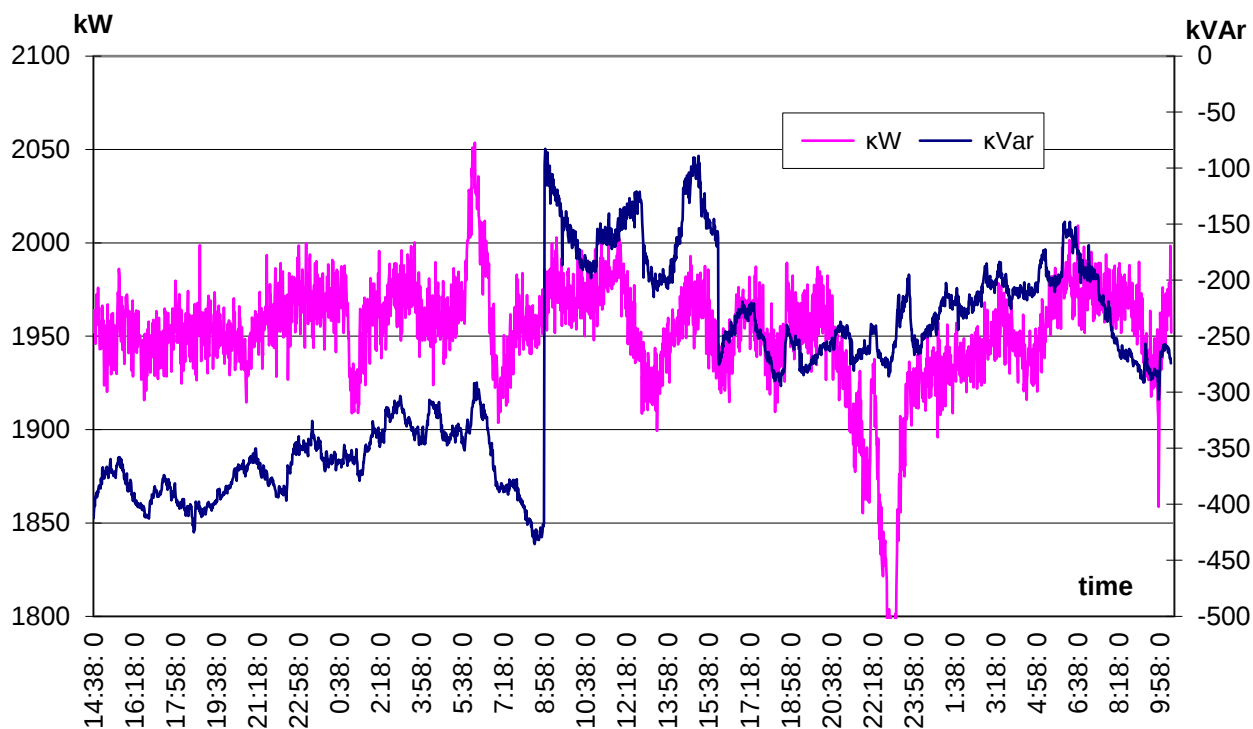


Фиг. V-24 Реактивна мощност във функция от възбудителния ток

V.4. Определяне на електрическите характеристики на електрозадвижването на топковите мелници в режим на работа на синхронния двигател на мелницата $\cos\varphi \approx 1$.

На фиг. V-27 е даден запис на консумираната активна и генерираната реактивна мощност на мелница за период от 44 часа.

В 9 h е намалено възбуждането на синхронния електродвигател с намерение да се постигне работа с $\cos\varphi \approx 1$. До този момент синхронният електродвигател е работил с активно натоварване около 1970 kW и е генерирал реактивна мощност в границите 300-420 kVAr. След намаляването на възбудителния ток не е постигната работа с $\cos\varphi \approx 1$, а генерираната реактивна мощност рязко е намаляла и в продължение на 7 часа мелницата е работила в режим на генериране на реактивна мощност около 150 kVAr. В 16 h възбудителния ток на синхронния двигател е увеличен, което води до рязко увеличаване на генерираната реактивна мощност.



Фиг. V-27 Активна и реактивна мощност за 44 часа

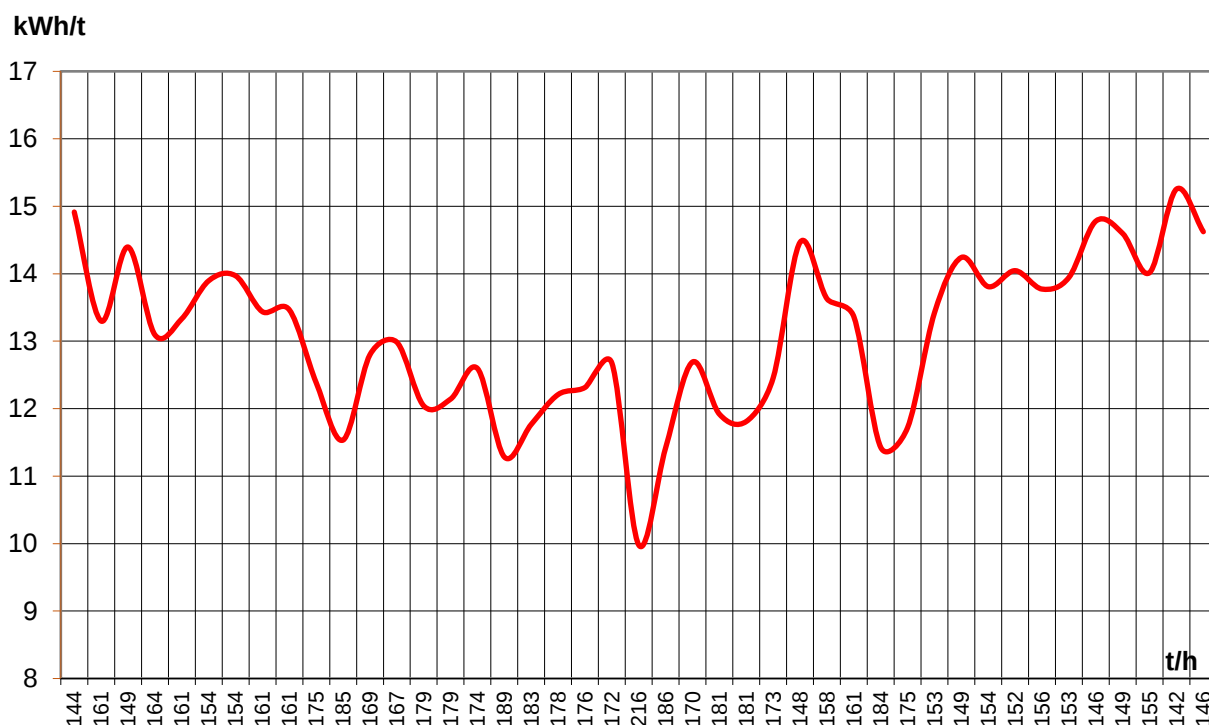
Проведеният експеримент дава основание за следните заключения:

- От съпоставката на гранулометричния състав на изходния продукт от мелницата преди намаляването на възбудителния ток и по време на работа с $\cos\phi \approx 1$ се установи, че няма промяна в структурата на изходния продукт.

- Синхронният двигател на топковата мелница работи стабилно продължително време в режим $\cos\phi \approx 1$. Активната мощност запазва характера си – около 1950 kW.

- Специфичният разход на електроенергия за изследвания период е бил в границите 9,98 – 15,25 kWh/t, със средна стойност 13,41 kWh/t. Средните часови стойности за периода са както следва :

- средна часова активна мощност- 1952 kWh;
- средно натоварване - 169,36 t/h.



Фиг. V-28 Зависимост на специфичния разход от часовата производителност

На фиг. V-28 е представена зависимостта на специфичния разход на електроенергия от часовата производителност на мелницата. От нея се вижда, че в часовете когато мелницата работи с по-голямо натоварване, специфичният разход има ниски стойности. Например, при общо натоварване 216 t/h специфичният разход на електроенергия е 9,98 kWh/t, а при натоварване 142 t/h – 15,25 kWh/t.

Изводи:

1. Изследвано е влиянието на топковия товар и натоварването с руда върху специфичния енергоразход.
2. Проведени са наблюдения и са направени изводи за това какво е влиянието различните видове топки като размер и производител върху потребяваната енергия, а така също и върху технологичния режим на мелницата.
3. Експериментално е установено, че относителната ъглова скорост, с която се върти барабана, а не абсолютната е определяща за производителността на мелницата, респективно – специфичния разход на електроенергия.
4. Определени са специфичните електрически загуби на мощност в статора и ротора за генериране на реактивна енергия. Построени са U-образните характеристики на синхронния електродвигател.
5. Представени са двата типа синхронни електродвигатели, използвани като стандартно оборудване за мелничните агрегати. Анализирани са влиянието

на натоварването с руда върху потребяваната мощност. Генерирани са съответните графики и таблици.

ГЛАВА VI. МЕТОДИ ЗА НАМАЛЯВАНЕ НА СПЕЦИФИЧНИЯ РАЗХОД НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯ ПРИ ЗАДВИЖВАНЕ НА ТОПКОВИ МЕЛНИЦИ

VI.1. Електрически методи

VI.1.1. Оптимално определяне на генерираната капацитивна мощност от синхронните електродвигатели

От проведените експерименти в глава V са синтезирани резултатите и са представени в таблица VI-1 регистрираните моментни стойности на генерираната капацитивна мощност за десет синхронни електродвигатели.

Таблица VI-1 Моментни стойности на генерирана капацитивна мощност

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
kVAr кап.	300	400	800	500	550	650	300	350	700	800

Общо генерираната реактивна мощност е 5350 kVAr. Средно на една машина се падат по 535kVAr генерирана капацитивна мощност.

При провеждане на технико-икономически изчисления за оптимизиране на работата на синхронните машини трябва да се отчитат и специфичните загуби на активна мощност на компенсиращите устройства – α_k . От проведените експериментални изследвания (табл. V-6 и табл. V-7) при генериране средно около 500 kVAr капацитивна мощност може да бъде приета една средна стойност на специфичните загуби и за двата вида двигатели – $\alpha_k=0,016 \text{ kW/kVAr}$. Отчетено е, че електродвигателите с по-ниски специфични загуби са 3 броя.

От проведени наблюдения са отчетени стойности за генерираната реактивна мощност от синхронните електродвигатели на мелниците в диапазона 5000-6000 kVAr. При допускане, че средно на една машина се падат по 500 kVAr генерирана капацитивна мощност, годишните загуби на активна електроенергия за генериране на посочените стойности реактивна мощност при експериментално заснетите специфични загуби са:

$$W_M = \alpha_k \cdot m \cdot Q_M \cdot T_M \cdot N_M = 0,016 \times 500 \times 8584 \times 10 = 775\,392 \text{ kWh.} \quad (\text{VI-1})$$

Където: W_m – годишни загуби на активна електроенергия в мелниците за генериране на реактивна енергия, kWh;

Q_m – ориентировъчни стойности за генериране на реактивна мощност от синхронните електродвигатели на мелниците, kVAr;

T_m – време на работа в годината на мелниците, h (стойностите и T_m са определени по предоставени от специалистите към фабриката данни за коефициентите на движение за мелниците – 98%).

N_m – брой на работещите синхронни електродвигатели (без тези на мелниците за досмилане).

Необходим е анализ по проблемите за компенсиране на реактивните товари в подстанцията на обогатителната фабрика. Ако синхронните електродвигатели на мелниците преминат в режим на работа $\cos\varphi = 1,0$, главната понижаваща подстанция на предприятието се нуждае от допълнително компенсиране на реактивните товари за реализиране на среден $\cos\varphi = 0,9$ за 15 минутен интервал. Подходящо решение е да се инсталират кондензаторни батерии към двете секции 6 kV в цеховите подстанции с обща мощност 5000 kVAr.

В този случай загубите за генериране на необходимата реактивна мощност ще бъдат:

$$W_k = \alpha_k \cdot k \cdot Q_c \cdot T = 0,003 \times 5000 \times 8760 = 131\,400 \text{ kWh.} \quad (\text{VI-2})$$

Където: W_k – годишни загуби на активна електроенергия в кондензаторните уредби за генериране на реактивна енергия, kWh;

- $\alpha_k \cdot k$ – специфични загуби на активна мощност за генериране на капацитивна мощност, kW/kVAr;

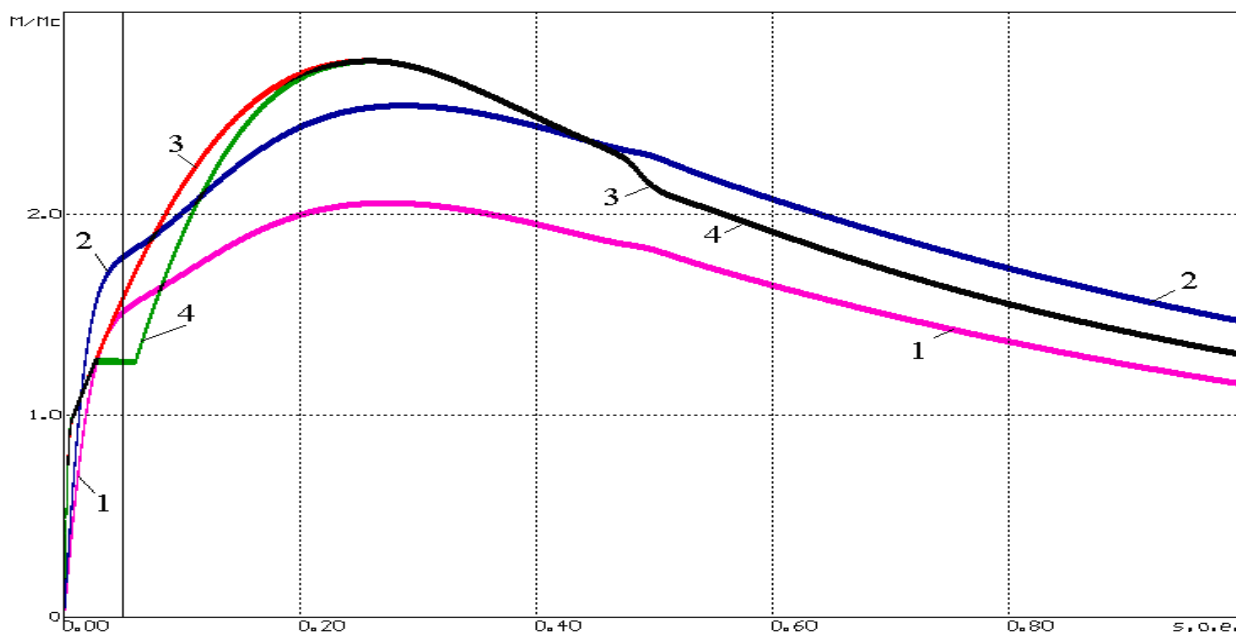
- Q_c – мощност на кондензаторната уредба, kVAr;

- T – време на работа на кондензаторната уредба в годината, h.

Това ще доведе до годишна икономия на електроенергия:

$$775\,392 - 131\,400 = 623\,992 \text{ kWh.}$$

VI.1.2. Оптимизиране на загубите в задвижването на мелници



Фиг. VI-1. Форма на механическите характеристики при пусково съпротивление 3,2 Ω , за двигател 2 MW (крива 1) и 2,5 MW (крива 2), при управление съпротивлението на получените максимални средно-съставляващи (крива 3) и минимални променливи съставляващи на момента (крива 4)

В IV.1.1 теоретично е доказано, че за задвижване на този тип мелница е достатъчен двигател с мощност 2 MW. Това се доказва и от експерименталните изследвания в глава V, при които мощността не надвишава 2 MW.

Проблемът при преминаване към по-малка мощност на двигателите е, пониженият им пусков момент. На фиг. VI-1 е показана пусково-механическата характеристики на двигател с мощност 2 MW и 2,5 MW, с пусково съпротивление във веригата на възбуждането 3,2 Ω . За сравнение, пусковите съпротивления на изследваните двигатели на мелници са със стойности 0,7 Ω и 1,4 Ω . По-голямата стойност е при по-тежко задвижване (системно претоварвани с топки мелници).

В IV.2 теоретично са определени загубите в задвижването на разглежданият тип мелница за двата двигателя.

$$\Sigma P_{2500} = P_{\text{ст}} + P_{\text{м}} = 27,87 + 73,2 = 102,07$$

$$\Sigma P_{2000} = P_{\text{ст}} + P_{\text{м}} = 23,22 + 61,8 = 85,02$$

Разликата в загубите на мощност ще бъдат

$$\Delta P = \Sigma P_{2500} - \Sigma P_{2000} = 102,07 - 85,02 = 17,05 \text{ kw}$$

Разликата в годишните загуби на електроенергия при коефициент на използване на мелницата 8584 часа, ще бъде:

$$\Delta W_{\text{год}} = T * 17,05 = 8584 * 17,05 = 143,357 \text{ MWh}$$

VI.2. Технологични методи

Чрез направените изследвания и анализи в предишните глави е достигнато до извода, че при правилно установен технологичен режим на работа има възможност да се постигнат значителни икономии на енергия, материали и резервни части, което ще доведе до снижаване на разходите.

VI.2.1. Оптимално определяне на топковият товар

Процентното запълнение с мелещи тела е от основно значение за работата на топковите мелници. При работата си футеровката се износва и по този начин мелницата променя обема си, затова запълнението с топки е прието да се представя като процент от работния обем на цилиндъра. След направени изследвания в глава V.2.2 е установен часовия разход на топки, който е различен в зависимост от различните производители. Направени са изводи за това как влияе запълнението с топков товар върху консумираната електроенергия от топковата мелница на база измервания за продължителен период от време. В глава II.2 бяха описани различните режими на работа на топковите мелници и движението на намиращите се в нея мелещи тела. Променяйки количеството топков товар се променя и установения режим на работа. В V.2.2.1, след проведените експериментални изследвания се стига до извода, че при запълнение с топки в порядъка на $36 \div 38 \%$ резултатите на изследваните мелници са най-добри.

VI.2.2. Оптимално определяне на постъпващата руда

Най-важния технологичен параметър е количеството руда постъпващо за смилане в топковата мелница. Натоварването с материал не влияе толкова силно, колкото топковия товар върху потребяваната мощност, но все пак в голяма степен оказва влияние. Основният параметър характеризиращ консумацията на електроенергия от мелничния агрегат е така наречения специфичен разход на енергия. Той показва какво е количеството на потребена електроенергия за получаването на тон готова продукция. Както бе споменато разходите за електроенергия са приблизително половината от общите разходи при процеса смилане и затова целта е да се натовари в максимална степен мелничния агрегат при запазване в норма качеството на готовия продукт.

Изводи

1. Установено е, че синхронните двигатели е целесъобразно да работят с $\cos\varphi=1$, като недостигащата за предприятието капацитивна мощност да бъде осигурявана от кондензаторни батерии.

2. Проведени са експериментални изследвания за определяне на влиянието на топковия товар на електрическите и технологичните параметри на мелниците.
3. Доказва се възможността за пускане на мелничния агрегат със синхронен двигател СДС 19-46-4УХЛ4 с мощност 2 MW.
4. Коментирани са параметрите на техническата система – мелница-задвижващ двигател и механична предавка, ъглова скорост на барабана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Направен е анализ на техническите възможности за намаляване на специфичния разход на електроенергия при задвижването на топкови мелници, обхващаща:

1. Изследвания за оптимизация на технологичния процес на агрегатите (топкови мелници) с оглед постигане на по-нисък специфичен разход на електроенергия.
2. Изследвания за режимите на работа на синхронните машини с цел намаляване на загубите на електроенергия в тях.
3. Оценена е загубата на мощност и електроенергия при задвижването на топкови мелници.
4. В съответствие с целите на дисертацията са проведени експериментални изследвания на мелнични агрегати. Резултатите от експерименталните изследвания са обработени и анализирани.

От извършената работа могат да бъдат направени следните **изводи към дисертацията**:

1. Консумираната от мелничните агрегати електроенергия зависи най-вече от количеството на смилащата среда, при което определящ фактор за икономия е специфичният разход на електроенергия за количество преработена продукция.
2. Върху количеството и качеството на преработената продукция съществено влияе технологичния процес на смилане.
3. Връзката между активната мощност, консумирана от електродвигателите от една страна и съвкупността от фактори, обуславяща технологичния процес е умерена.
4. Използването на електродвигател с по-малка мощност ще доведе до значителни икономии на електроенергия, дължащи се на по-малките загуби в него, като в същото време ще бъде осигурен необходимия механичен момент.

5. Установено е, че синхронните двигатели е целесъобразно да работят с $\cos\varphi=1$, като недостигащата за предприятието капацитивна мощност да бъде осигурявана от кондензаторни батерии

От дисертационният труд може да се формулират следните **приноси**:

1. Научно приложни:

- Чрез направен математически модел и статистически методи е установено, че факторите определящи технологичния процес са със слабо влияние върху потребяваната мощност. Доказано е, че чрез правилното им управление може да бъде увеличена производителността, като по този начин се намалява специфичния разход на електроенергия.
- Практически изследвано и анализирано е влиянието на запълнението с топов товар върху консумираната електроенергия. Доказано е, че при запълнение с топки в порядъка на $36 \div 38 \%$, изследваните мелници работят с най-висока производителност и най-нисък специфичен разход на електроенергия.
- Изведени са регресионните уравнения и съответно коефициент на детерминация при всяка една от регресионните криви на факторите, обуславящи технологичния процес.

2. Приложни:

- Чрез теоретични и експериментални изследвания е доказана възможността, че използваният в момента като стандартна окомплектовка електрически двигател може да бъде заменен с по-маломощен.
- Чрез експериментални изследвания и теоретична обосновка е доказано, че минимизиране на реактивните товари, генерирани от синхронните двигатели са предпоставка за намаляване на специфичния разход на електроенергия.
- Експериментално е установено, че относителната ъглова скорост, с която се върти барабана, а не абсолютната е определяща за производителността на мелницата, респективно – специфичния разход на електроенергия.

Списък на публикациите по дисертационния труд:

1. Четьов Ст., Автоматизирана система за управление на технологичния процес в мелнично отделение в "Елаците МЕД" АД, Национална научно-техническа конференция с международно участие Булкамк, 2014, стр. 63 - 68
2. Chetyov S., Dzhustrov K., Ore load influence on ball mills specific electricity consumption, Journal of Mining and Geological Sciences, Volume 63, 2020, pp 138-141
3. Четьов Ст., Изследване на компенсиращата способност на синхронни електродвигатели върху специфичния разход на мелнични агрегати, XVI Международна конференция по открит и подводен добив на полезни изкопаеми, Варна, 2021, стр. 313-317

SUMMARY

Title: Study of the specific electricity consumption of ball mills and methods for increasing their energy efficiency.

Author: Stoyan Ivanov Chetyov

The aim of the dissertation is to propose methods for reducing the specific energy consumption of mill units, as well as conducting experimental studies of their work.

The growth of world economic output is increasing rapidly, leading to a significant increase in fuel and energy needs. Rational electricity consumption is one of the factors contributing to the sustainable development of the economy in all industries. One of the most energy-intensive industries is the production of metal concentrates. Improving the efficiency of their production mainly depends on saving the cost for electricity used in the process of grinding ores.

The first two chapters of the dissertation present the ball mills, the different constructions and modes of operation. It was made a literature review on the topic, examining various problems and solutions presented in scientific publications.

In the third chapter an analysis of the archive of data on the values of technological parameters is made, mathematical models are developed for their influence on the consumption of electric power by the synchronous motor driving the ball mill. The main constructive parameters required for the design of the facility, as well as losses occurring in electric motors are discussed in chapter four.

Experimental studies showing the dependence of electricity consumed by the mills and the impact of certain technological parameters on energy consumption are presented in chapter five. The electrical characteristics are determined on the basis of the records of the measured values.

In the sixth chapter are proposed methods for reducing the specific consumption of electricity in the drive of ball mills, and solutions are proposed in two directions - electrical and technological approaches to optimization.

Key words: energy saving, specific energy consumption, ball mills, optimization of grinding process