Повышение энергоэффективности конусной дробилки в технологической схеме рудоподготовки ЗИФ «Вернинское»

Введение. Процессы дробления и измельчения минерального сырья в горной и строительной промышленности являются широко распространенными и к тому же энергоемкими технологическими процессами, потребляющими около 20% от потребляемой горно-обогатительным предприятием электрической энергии [1].

Тенденция развития рудоподготовки — это использование высокопроизводительного оборудования большой единичной мощности и интенсификация процессов дробления. Для дробления материалов применяются щековые, молотковые и конусные дробилки.

Наибольшее применение для дробления твердых материалов нашли конусные дробилки, в которых раздавливание кусков материала происходит внутри неподвижной конусообразной чаши конусом, совершающим круговое качение. Конусные дробилки применяются для крупного, среднего и мелкого дробления. При вращении головка подвижного конуса с одной стороны приближается к корпусу, разрушая куски сырья, а с другой – удаляется от него, обеспечивая высыпание продукта.

У конусных дробилок среднего и мелкого дробления в зависимости от перерабатываемой руды легко регулируется разгрузочная щель, а следовательно, и производительность. Дробилки являются агрегатами непрерывного действия и способны работать под завалом, поэтому допускается подача горной массы без перерыва при помощи конвейеров. Так же работа под завалом для некоторых дробилок является обязательным условием для реализации принципа дробления «камень о камень», заключающийся в создании стесненных условий в камере дробилки, при которых около 30% дробимого материала измельчается трением друг о друга.

1. Состояние вопроса энергоэффективности конусных дробилок

Энергоэффективность работы дробилок определяется техническим удельным расходом электроэнергии, определяемым как отношение потребляемой электрической мощности P к производительности дробилки Q, .

При эксплуатации дробилки изменяются параметры дробимого материала, режимы работы дробилки и энергоэффективность дробилки, которая характеризуется эксплуатационным удельным расходом электроэнергии, равным отношению потребленной электроэнергии за смену (сутки) к объему или весу выпущенного продукта.

Анализ работ по исследованию энергетических характеристик конусных дробилок показал, что в работах [1] аналитически и экспериментально исследовано влияние конструктивных и режимных параметров на энергопотребление дробилок и обоснованы их конструктивные параметры. В работах [6] предложено характеризовать уровень энергопотребления дробилок удельной мощностью и относительной мощностью и показано, что эти параметры зависят от крупности исходного материала, степени дробления, крепости пород. Экспериментальные энергетические характеристики дробилок получены для ряда серийно выпускаемых дробилок применительно к конкретным физическим свойствам дробимого материала [1]. В работах [2,3,6] для определения мощности, потребляемой электроприводом и производительности дробилки, приведены различные формулы, полученные аналитически или экспериментально. Большинство из них рассчитаны для конкретных типов дробилок, либо дают результаты, отклоняющиеся от данных завода изготовителя.

Кроме этого, существует большое количество разработок САУ конусных дробилок, где рассмотрены системы по стабилизации мощности, потребляемой электроприводом [7], размера щели дробилки, а также регулирования скорости вращения электропривода [8].

Процесс дробления материалов является энергоемким и существенно повышает себестоимость и снижает конкурентоспособность конечного продукта горнодобывающего предприятия. Поэтому исследование, направленные на повышение энергоэффективности конусной дробилки является актуальным.

**Цель работы**. Исследование закономерностей формирования энергетических характеристик дробилки и разработка технических решений повышающих энергоэффективность .

Для реализации цели в работе представлены следующие задачи:

-Исследование влияния параметров дробимой руды, скорости вращения конуса дробилки, коэффициента дробления, размера исходного материала и продукта дробления на энергетические параметры дробилки, потребляемую мощность и удельный расход электроэнергии.

-Замена редукторного электропривода ленточного конвейера на безредукторный электропривод с синхронным двигателем с постоянными магнитами и технико-экономическая оценка замены.

2. Исследование энергетических характеристик конусной дробилки

Для определения удельного расхода электроэнергии и оценки энергоэффективности дробилки необходимо исследование ее энергетических характеристик – зависимостей потребляемой мощности и удельного расхода электроэнергии в функции параметров дробимого материала и режимов ее работы. Применен метод численного эксперимента с помощью аналитической модели.

При исследовании, для определения мощности, потребляемой электроприводом, применена формула [6]:

 $N\_{дв}=\frac{π^{2}σ^{2}D\_{к}}{0,01224Eη}\left(D\_{св}^{2}-d\_{св}^{2}\right)nK\_{пр} $ (1)

гдеσ– временное сопротивление сжатию исходного материала, МПа;Dk - диаметр основания дробящего конуса, м; Е - модуль упругости материала, МПа; η – механический КПД привода; Dсв и dcв – средневзвешенный размер, соответственно, исходного материала и продукта дробления, м; n – частота вращения (качаний) дробящего конуса, об/с; kпр – суммарный поправочный коэффициент учитывающий типоразмер и конструктивное исполнение дробилки, динамику процесса дробления и степень заполнения камеры дробления.

Объемная производительность конусной дробилки определялась по формуле [3]:

$$V=πd\_{св}D\_{к}lnμ,$$

где $l=\frac{D\_{к}}{12}$ – высота зоны параллельности; μ - коэффициент разрыхления материала.

Исследование было проведено для дробилки METSO HP-300, которая отличается высокой надежностью, повышенной производительностью, простотой и удобством технического обслуживания.

Технические характеристики дробилки METSO HP-300:

Производительность Q - 190-730 т/ч ; максимальная рекомендуемая мощность Nmax - 220 кВт; скорость вращения приводного вала n - 11,6-20 об/с; диаметр основания подвижного конуса Dk - 1,078 м; ширина разгрузочной щели b - 0,01-0,045 м; механический КПД привода η - 0,85.

Параметры дробимого материала соответствуют месторождению «Вернинское»:

Временное сопротивление сжатию исходного материала σ - 60-130 МПа; среднее значение временного сопротивления сжатию исходного материала σ - 99 Мпа; модуль упругости материала Е - 7000 МПа; коэффициент разрыхления материала μ – 0,5; плотность руды ρм – 2,7 т/м3; средневзвешенный размер соответственно исходного материала Dсв – 0,06 м.

Для расчета мощности электродвигателя при различных исследуемых параметрах необходимо рассчитать Кпр - суммарный поправочный коэффициент характеризующий типоразмер и конструктивное исполнение дробилки.

По формуле (1) для предельных параметров материала дробилки и максимальной установленной мощности дробилки найден Кпр:

$$K\_{пр}=\frac{0,01224EηN\_{дв}}{π^{2}σ^{2}D\_{к}\left(D\_{св}^{2}-d\_{св}^{2}\right)n}$$

Для рассматриваемой конусной дробилки METSO HP-300 и при Dсв=60 мм, ширине разгрузочной щели равной 10 мм и средневзвешенном размере частиц дробления равен dсв=20 мм коэффициент Kпр=1,39

Принимая, что размер продукта дробления равен ширине разгрузочной щели, рассчитаны зависимости производительности (Q), потребляемой мощности электродвигателя (p) и удельного расхода конусной дробилки (ω) от коэффициента дробления (i), представленные на рис. 1.

*Рис. 1 Зависимость удельного потребления электроэнергии от коэффициента дробления*

Из данных рис. 1 следует, для σmax=130 при изменении коэффициента дробления от 1,3 до 6 производительность дробилки уменьшается от 1329 т/ч до 295 т/ч; потребляемая электроприводом мощность растет в пределах от 108 кВт до 240 кВт, а удельное энергопотребление увеличивается 0,08 кВтч/т до 0,81 кВтч/т

*Рис. 2 Зависимость удельного потребления электроэнергии от сопротивления сжатию исходного материала*

При изменении предела прочности при сжатии от 60 МПа до 130 Мпа при i=4,6 мощность, потребляемая электродвигателем дробилки, растет в виде квадратичной функции от 50 кВт до 235 кВт, при этом производительность остается равной 384 т/ч, а удельное энергопотребление увеличивается от 0,13 кВтч/т до 0,61 кВтч/т

*Рис. 3 Зависимость удельного потребления электроэнергии от скорости вращения конуса*

Из рисунка 3 следует, что при увеличении скорости вращения дробилки от 700 до 1200 об/мин производительность увеличивается от 172 т/ч до 295 т/ч при этом мощность растят прямо пропорционально производительности дробилки от 128 кВт до 220 кВт, а удельное энергопотребление при этом не изменяется и равно 0,74 кВтч/т.

По результатам исследования были установлены зависимости мощности, потребляемой двигателем и производительности конусной дробилки от сопротивления сжатию исходного материала (σ), коэффициента дробления (i), частоты вращения подвижного конуса (n). Исследования позволяют выяснить параметры, которые влияют на удельный расход электроэнергии. Исходя из зависимостей можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением коэффициента дробления мощность, потребляемая электроприводом, увеличивается неравномерно, при этом производительность дробилки снижается, а показатель удельного энергопотребления растет;

2. При увеличении придела прочности при сжатии и неизменном коэффициенте дробления мощность, потребляемая электроприводом дробилки и удельное энергопотребление, увеличиваются, а производительность не изменяется;

3. С увеличением скорости вращения мощность, потребляемая электроприводом дробилки и производительность дробилки, увеличиваются прямо пропорционально. При этом удельное энергопотребление не изменяется;

4. Установленные зависимости удельного расхода от параметров исходного материала и режимов работы дробилки позволяют оценить ее энергоэффективность и могут быть использованы при автоматизации процесса дробления.

На основе анализа результатов исследования предложены технические решения по улучшению энергоэффективности конусной дробилки:

1. Разработка безредукторного электропривода ленточного питателя с синхронным двигателем с постоянными магнитами;

2. Разработка регулируемого электропривода конуса дробилки;

3. Разработка системы автоматического регулирования, которая обеспечивает заданную производительность дробилки при минимальном удельном расходе электроэнергии.

Из вышеуказанного детально было рассмотрено 1 решение, для которого было проведено технико-экономическое обоснование.

Анализ синхронных двигателей с постоянными магнитами, разработанных различными фирмами, показал, что стоимость экспериментальных образцов равно 1-1,5 млн. руб. Исходя из опыта разработки систем электропривода и других технических изделий можно сделать вывод, что стоимость изготовления экспериментальных образцов снижается в примерно 2 раза и при серийном производстве стоимость снижается еще в 1,5-2 раза. В связи с этим при технико-экономическом анализе стоимость СДПМ рассмотрена в пределах от 100 тыс. руб. до 1 млн. руб.

Для замены привода с редуктором и асинхронным двигателем на безредукторный с синхронным двигателем с постоянными магнитами необходимо рассчитать технические характеристики, которыми должен обладать СДПМ.

Было решено производить замену на ленточном конвейере КЛС – 650 с двигателем SEW KA97/T DRS160 M4 BE20HR.

Характеристики конвейера представлены в табл. 1

Табл. 1 Характеристики ленточного конвейера

|  |  |
| --- | --- |
| Производительность конвейера, т/ч | 200 |
| Скорость движения ленты, м/с | 1,6 |
| Длина конвейера, м | 22,4 |
| Угол наклона, град | 17°30' |
| Ширина ленты, мм | 650 |
| Мощность привода, кВт | 11 |

Выбор синхронного двигателя с постоянными магнитами производим в следующем порядке:

1. Найдем угловую скорость барабана конвейера:

$$ω\_{б}=\frac{2υ\_{к}}{D\_{б}}=2\*\frac{1,6}{0,5}=6,4 с^{-1}$$

2. Найдем угловую скорость вала двигателя:

$$ω\_{дв}=0,105\*n\_{дв}=0,105\*1465=153,3 с^{-1}$$

3. Найдем передаточное отношение редуктора:

$$i=\frac{ω\_{дв}}{ω\_{б}}=\frac{153,3}{6,4}=24$$

4. Найдем момент на валу двигателя:

$$М\_{дв}=\frac{P\_{дв}}{ω\_{дв}}=\frac{11000}{153,3}=71,75 Нм$$

4. При отсутствии редуктора момент, который необходимо развивать СДПМ будет равен:

$$М\_{сдпм}=М\_{дв}\*i=71,75\*23,9=1715 Нм$$

5. Найдем скорость вращения вала СДПМ:

$$n\_{сдпм}=\frac{ω\_{б}}{0,105}=\frac{6,4}{0,105}=61\frac{об}{мин}$$

Выбираем двигатель 1FW6160 c характеристиками представленными в табл.2

Табл. 2 Характеристики выбранного СДПМ

|  |  |
| --- | --- |
| Номинальное напряжение Uн, В | 600 |
| Максимальный момент вращения Mmax, Нм | 2860 |
| Момент вращения состояния покоя M0, Нм | 1870 |
| Номинальный момент вращения Mн, Нм | 1750 |
| Макс. число оборотов при макс. моменте вращения nmax  при Mmax, мин-1 | 68 |
| Макс. число оборотов при ном. моменте вращения nмах при Mн, мин-1 | 110 |
| Момент инерции ротора J, 10-2 кгм2 | 53,1 |
| Вес около статор+ротор | 124,3 |
| Ток состояния покоя I0, А | 56 |
| Ном. ток Iн, А | 52 |
| Макс. ток Imax, А | 98 |
| Расчетная мощность Ррасч, кВт | 46,9 |
| SINAMICS S120 модуль двигателя Требуемый ном. ток Iн/ Imax, А | 60/113 |

Внедрение СДПМ будет оправдано, если будет обеспечено получение достаточного экономического эффекта на каждый рубль вложенных средств.

Для анализа оправданности внедрения СДПМ в работу ГОК «Вернинский» проведем технико-экономический анализ, в котором сравним затраты на эксплуатацию базового варианта с применением АД и варианта технического решения с применением СДПМ

Технико-экономическая оценка мероприятий по повышению энергоэффективности должна включать:

- техническое решение по разрабатываемому мероприятию,

- расчет капитальных затрат,

- расчет эксплуатационных затрат и экономии,

 - расчет периода окупаемости вложений.

1. Техническое решение по разрабатываемому мероприятию.

Предлагаемым решением является замена редукторного электропривода с асинхронным двигателем на безредукторный электропривод с синхронным двигателем с постоянными магнитами. Данное решение направлено на повышение энергоэффективности за счет повышения КПД и уменьшения подвижных элементов механизма, которые нуждаются в постоянном обслуживании.

 Для расчета примем время работы конвейера равным T=7500 ч/г; Нагрузка конвейера равномерная; Потребляемая мощность равна номинальной мощности; cos=0,85; КПД СДПМ равным 0,95; Цена на электроэнергию Ц=2,2 руб/кВтч

2. Расчет капитальных затрат.

Капитальные затраты для реализации включают: стоимость оборудования, затраты на проектные и монтажные работы, затраты на доставку оборудования.

Примем что стоимость электродвигателя 1FW6160 равной 100 тыс. руб., стоимость проектных и монтажных работ примем равной 10% от стоимости электродвигателя, доставку примем равной 5% от стоимости электродвигателя.

Полученные данные представлены в табл. 3

Табл. 3 Капитальные затраты



3. Расчет эксплуатационных затрат и экономии

Расчет эксплуатационных затрат и экономии производим в следующем порядке:

1. Производим расчет потребляемой энергии в год при базовом (существующем) варианте W1 :

$$P\_{АД}=\frac{M\_{н}0,105n\_{АД}}{η\_{АД}η\_{ред}}=\frac{71,75\*0,105\*1465}{0,875\*0,80}=15767,1 Вт$$

$$W\_{1}=P\_{АД}T=15767,1\*7500=118253 кВтч/год$$

2. Производим расчет потребляемой энергии в год при внедрении разрабатываемого мероприятия W2.

$$P\_{СДПМ}=\frac{M\_{н}0,105n\_{ СДПМ}}{η\_{СДПМ}}=\frac{1750\*0,105\*61}{0,95}=11799 Вт$$

$$W\_{2}=P\_{СДПМ}T=11799\*7500=88490,1 кВтч /год $$

3. Определяем экономию энергоресурсов ∆W:

$$∆W = W\_{1}- W\_{2}=118253-88490,1=29762,8 кВтч/год $$

4. Снижение эксплуатационных затрат на электроэнергию при внедрении разрабатываемого мероприятия находим по формуле:

$$∆Э\_{ээ}=∆WЦ=29762,8\*2,2=65478 руб./год,$$

где Ц – тариф на энергоресурс, руб/кВтч.

5. Рассчитаем стоимость обслуживания редуктора:

Предположим, что стоимость обслуживания редуктора равна 10% от стоимости редуктора, тогда стоимость обслуживания будет равна:

$$Ц\_{обслуж ред}=0,1\*50000=5 тыс.\frac{руб}{год}$$

6. Определим суммарное снижение эксплуатационных затрат:

$$∆Э\_{\sum\_{}^{}}=∆Э\_{ээ}+Ц\_{обслуж ред}=65,5+5=70,5 тыс. руб./год$$

Полученные данные представлены в табл. 4

Табл. 4 Расчет эксплуатационных затрат и экономии



4. Расчет периода окупаемости вложений

Расчет периода окупаемости вложений проводим без учета амортизационных отчислений и дисконтирования денежных средств.

 Расчет периода окупаемости проводился для стоимость синхронного двигателя в пределах от 100 тыс. руб. до 1 млн. руб. Полученные зависимости представлены на рис. 4

*Рисунок 4 Анализ зависимости срока окупаемости от стоимости СДПМ*

Из рис. 4 видно, что при стоимости СДПМ равной 100 тыс. руб. срок окупаемости предлагаемого технического решения составляет 1,4 года, при повышении стоимости до 500 тыс. руб. срок окупаемости составляет уже 7,1 год.

Отрасль производства синхронных двигателей с постоянными магнитами новая и в промышленности еще не налажено серийное производство, в связи с этим цены на данный тип двигателей довольно высокие.

Заключение.

1. Установлены зависимости влияния управляющих параметров (производительность дробилки, частота вращения подвижного конуса дробилки, величина входной щели), а также возмущающих параметров (сопротивление сжатию материала, размер исходного и конечного материала) на удельный расход электроэнергии. Наибольшее влияние на исследуемый параметр оказывают сопротивление сжатию и размеры материала.

2. Предложено техническое решение по замене редукторного электропривода с асинхронным двигателем на безредукторный электропривод с синхронным двигателем с постоянными магнитами,которое позволяет достигнуть суммарного снижения эксплуатационных затрат равного 70.5 тыс. руб в год при сроке окупаемости от 1.4 года до 6 лет в зависимости от стоимости СДПМ.

3. Технические решения по разработке системы регулируемого электропривода конуса дробилки и системы автоматического регулирования, которая обеспечивает заданную производительность дробилки, при минимальном удельном расходе электроэнергии требуют дальнейших исследований.

Список используемой литературы

1. Червяков, С. А. Обоснование конструктивных и режимных параметров энергосберегающих конструкций конусных дробилок: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. технич. наук (05.05.06) / Червяков Сергей Алексеевич; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург, 2004 – 24 с.

2. Пономарев, В. Б. Щековые и конусные дробилки: методические указания по курсовому проектированию/ В. Б. Пономарев, А. Б. Лошкарев.- Екатеринбург: ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – 71с.

3. Софронов, В. Л. Машины и аппараты химических производств / В. Л. Софронов. – Северск: СГТА, 2008. - 263 с.

4. Лагунова Ю. А. Энергопотребление при дроблении горных пород конусными дробилками // Известия УГГГА: сб. науч. ст. – Екатеринбург., 2000, №9. – 158-161 с.

5. Фурин В. О., Федулов К. А., Турьянский Б. В. Интеллектуальные конусные дробилки ПАО «Уралмашзавод» // Научно-технический и производственный журнал: горная промышленность. – 2016. - №6 (130) – 15-20 с.

6. Терещенко А. Н. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ / Терещенко А. Н. // МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ БГТУ ИМ. В. Г. ШУХОВА: Сборник труд. конф. – Белгород, 2017. – с. 2297-2304

7. [Прокофьев Е. В.](https://www.elibrary.ru/author_items.asp?refid=377694229&fam=%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D1%84%D1%8C%D0%B5%D0%B2&init=%D0%95+%D0%92) Автоматизация технологических процессов и производств. Часть 1. Автоматизация технологических комплексов подготовительных процессов: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006.

8. Марасанов В. М., Дылдин Г. П. Регулятор скорости вращения электропривода конусной дробилки // Известия УГГГА: сб. науч. ст. – Екатеринбург., 2017, №2. – 78-81 с.