

6
А-62

Министерство высшего и среднего
специального образования РСФСР

СВЕРДЛОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ им. В. В. ВАХРУШЕВА

На правах рукописи

Инженер Е. Ф. МОРОЗОВ

**АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И
ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
ДРОБИЛЬНО-РАЗМОЛЬНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

Специальность — 05173. Горная электромеханика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Свердловск — 1970

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РСФСР

Свердловский ордена Трудового Красного Знамени горный
институт имени В.В.ВАХРУШЕВА

На правах рукописи

Инженер Е.Ф.Морозов

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДРОБИЛЬ-
НО-РАЗМОЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Специальность - 05Г73. Горная электромеханика

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

Свердловск
1970

Работа выполнена в Центральной научно-исследовательской экономической лаборатории Министерства цветной металлургии.

Научный руководитель, кандидат технических наук, доцент

Петров И.П.

Научный консультант, кандидат технических наук, доцент

Трошин В.А.

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук Крюков Д.К.

доцент, кандидат технических наук Муйземнек Ю.А.

Ведущее предприятие НИИТЯЖМАШ при Уралмашзаводе.

Автореферат разослан " 21 " декабря 1970 года
Защита диссертации состоится " " 1971 года
на заседании Совета по присуждению ученых степеней горного
и горно-механического факультетов Свердловского ордена Трудового
Красного Знамени горного института имени В.В.Вахрушева.

Отзывы в двух экземплярах просим направлять по адресу:
г.Свердловск, ул.Куйбышева,30, горный институт, ученому секретарю.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета

доцент, к.т.н.

/Г.БАГАУТИНОВ/

Развитие тяжелой индустрии требует непрерывного увеличения производства черных и цветных металлов. Эффективное получение металлов возможно только из обогащенных руд.

Наиболее важными операциями при подготовке полезных ископаемых к обогащению являются дробление и измельчение. О важности этих операций свидетельствует тот факт, что на их осуществление расходуется много металла /до 3 кг на тонну руды/, свыше 60% всей электроэнергии, потребляемой обогатительной фабрикой и более половины капитальных затрат.

Весьма высокая стоимость дробильно-размольного оборудования и значительная энергоемкость процессов дробления и измельчения вызывает необходимость изыскания путей дальнейшего совершенствования этого оборудования с целью снижения как капитальных, так и эксплуатационных затрат.

В решении этой задачи, отражающей общую техническую политику по повышению качества и снижению себестоимости промышленной продукции, наряду с работами по созданию новых, более совершенных и производительных конструкций дробилок и мельниц, существенное значение приобретают вопросы повышения экономичности и надежности работы электропривода этих механизмов, который в значительной степени определяет эффективность всего обогатительного комплекса.

В настоящее время принято считать, что переходные процессы в электроприводе дробильно-размольного оборудования незначительны, а производственный процесс настолько груб, что к электро-

приводу не предъявляется каких-либо требований, кроме обеспечения заданной мощности. Тем не менее работа этих механизмов имеет специфические особенности, не учет которых вызывает снижение технико-экономических показателей работы электропривода.

Таким образом, исследование режимов работы электропривода дробильно-размольного оборудования с учетом особенностей последнего представляет определенный интерес для промышленности.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

В первой главе дан критический обзор литературы по теоретическим и экспериментальным вопросам, непосредственно связанным с предметом исследования.

Проведенный обзор исследований в области электропривода дробильно-размольного оборудования позволил наметить следующие задачи:

исследование особенностей нагрузочных диаграмм конусных дробилок 2200 среднего и мелкого дробления и выбор рационального типа электропривода;

анализ статических режимов работы шаровых мельниц /ШМ/ и разработка методов расчета полезной мощности с учетом влияния профиля футеровки;

исследование переходных процессов в электроприводе ШМ с целью определения оптимальных пусковых характеристик и мощности двигателей;

исследование и выбор рационального режима возбуждения синхронных двигателей /СД/ мельниц;

разработка рекомендаций по повышению технико-экономических показателей систем возбуждения СД мельниц.

Вторая глава посвящена исследованию работы электропривода конусных дробилок /КД/, комплектуемых асинхронным приводом.

На основании математической обработки осциллограмм мощности приводных двигателей КД 2200, эксплуатирующихся на Дзезказганском ГМК на дроблении наиболее вязких медно-сульфидных руд, построены нагрузочные диаграммы электропривода, которые затем были аппроксимированы периодическими функциями.

Анализ нагрузочных диаграмм показал, что электромагнитный момент двигателя в течение некоторого времени за нагрузочный цикл часто имеет отрицательное значение, то есть двигатель переходит в генераторный режим. Это обстоятельство вызвало необходимость учета упругой деформации передаточного звена.

Решение уравнения динамики асинхронного электропривода КД с упругим звеном представлено в следующем виде:

$$M_d = M_0 + \sum_k \frac{M_{сгk}}{\left[\left(\frac{B}{\beta^2} k^3 \gamma^3 - Bk\gamma \right)^2 + \left(1 - \frac{k^2 \gamma^2}{q\beta^2} \right)^2 \right]^{0.5}} \sin \left(k\gamma t + \varphi_k - \arctg \frac{Bk\gamma - \frac{Bk^3 \gamma^3}{\beta^2}}{1 - \frac{k^2 \gamma^2}{q\beta^2}} \right), \quad /I/$$

где M_d - электромагнитный момент двигателя;

M_0 - среднее значение статического момента;

$M_{сгk}$ - амплитудное значение k -ой гармоники статического момента;

B - электромеханическая постоянная времени привода;

β - собственная частота упругих колебаний системы;

γ - угловая частота основной гармоники, равная частоте качаний дробящего конуса;

q - коэффициент распределения инерционных масс;

φ_k - начальная фаза k -ой гармоники статического момента.

Анализ формулы /I/ показывает, что электромагнитный момент достигает максимума при частотах выше резонансной,

статический момент и момент сил упругости в гибком звене

находятся в квадратуре. Если отношение частот вынужденных и собственных колебаний лежит в пределах $1 > \frac{\nu}{\beta} > \sqrt{q}$, то увеличение момента инерции ротора двигателя приводит к увеличению амплитуды колебаний электромагнитного момента. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании КД.

Предложены расчетные формулы для определения эквивалентного момента асинхронного двигателя и коэффициента жесткости упругого звена по заданной амплитуде переменной составляющей электромагнитного момента

$$M_{дз} = M_0 \left[1 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\frac{M_{св.к}^2}{M_0^2}}{\left(\frac{B}{\beta^2} k^2 \nu^2 - B k \nu \right)^2 + \left(1 - \frac{k^2 \nu^2}{q \beta^2} \right)^2} \right]^{0.5} \quad /2/$$

■

$$\frac{\nu^2}{\beta^2} = \frac{q}{1 + q^2 B^2 \nu^2} \left[1 + q^2 B^2 \nu^2 + \sqrt{\left(1 + q^2 B^2 \nu^2 \right) \frac{M_{св.к}^2}{M_{дз}^2} - B^2 \nu^2 (1 - q^2)} \right], \quad /3/$$

где $M_{дз}$ — допустимая амплитуда переменной составляющей электромагнитного момента.

Ряд исследователей для повышения технико-экономических показателей электропривода КД рекомендует устанавливать синхронные двигатели. При этом влияние упругих связей на величину и характер электромагнитного момента не учитывается.

На основе анализа уравнения динамики синхронного электропривода КД, полученного с учетом упругого звена, найдена формула для отклонения угловой координаты ротора СД:

$$\Delta \alpha = \frac{\frac{M_{св.к}}{M_0}}{\left[\nu^2 d^2 \left(1 - \frac{\nu^2}{q \beta^2} \right)^2 + \left(1 + \frac{\nu^4}{\sigma^2 \beta^2} - \frac{\nu^2}{\sigma^2} - \frac{\nu^2}{q \beta^2} \right)^2 \right]^{0.5}} \sin \left[\nu t - \arctg \frac{\nu d \left(1 - \frac{\nu^2}{q \beta^2} \right)}{1 + \frac{\nu^4}{\sigma^2 \beta^2} - \frac{\nu^2}{\sigma^2} - \frac{\nu^2}{q \beta^2}} \right], \quad /4/$$

- 6 -

где M_0 — синхронизирующий момент;

d — параметр, характеризующий успокоение системы;

σ — собственная частота колебаний ротора СД.

При механическом резонансе ($\beta = \nu$) отклонение угловой координаты пропорционально отношению инерционных масс двигателя и механизма и зависит от демпфирующих свойств СД. При $\frac{\nu}{\beta} = \sqrt{q}$ отклонение угловой координаты не зависит от момента инерции и демпфирующих свойств СД.

Эквивалентный момент синхронного двигателя и необходимое значение жесткости упругого звена при заданном отклонении угловой координаты могут быть определены по следующим формулам:

$$M_{дз} = M_0 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\frac{M_{св.к}^2}{M_0^2} (1 + \nu^2 d^2)}{\nu^2 d^2 \left(1 - \frac{\nu^2}{q \beta^2} \right)^2 + \left(1 + \frac{\nu^4}{\sigma^2 \beta^2} - \frac{\nu^2}{\sigma^2} - \frac{\nu^2}{q \beta^2} \right)^2} \right]^{0.5} \quad /5/$$

■

$$\frac{\nu^2}{\beta^2} = a + \sqrt{a^2 + b}, \quad /6/$$

где

$$a = q \frac{1 + \nu^2 d^2 - \frac{\nu^2}{\sigma^2} \left(1 + q - q \frac{\nu^2}{\sigma^2} \right)}{\nu^2 d^2 + \left(1 - q \frac{\nu^2}{\sigma^2} \right)^2};$$

$$b = q^2 \frac{\left(\frac{M_{св.к}}{\Delta \alpha M_0} \right)^2 - \nu^2 d^2 - \left(1 - \frac{\nu^2}{\sigma^2} \right)^2}{\nu^2 d^2 + \left(1 - q \frac{\nu^2}{\sigma^2} \right)^2}.$$

Используя полученные расчетные формулы и параметры электро-механической системы двигатель-дробилка, были найдены уравнения нагрузочных диаграмм КД 2200 среднего и малого дробления. При помощи этих уравнений установлено, что, несмотря на значительное

недоиспользование по нагреву, применяемые асинхронные двигатели не могут быть заменены асинхронными двигателями меньшей мощности из условий перегрузочной способности.

В результате аналитического исследования вопросов, связанных с использованием для привода КД синхронных двигателей, установлено, что для обеспечения их устойчивой работы необходимо использовать искусственные средства демпфирования колебаний ротора СД. Показано, что наиболее экономичным способом демпфирования колебаний СД в приводах КД является метод, основанный на использовании потенциальной энергии упругой деформации соединительной эластичной муфты. В частности, рекомендуется высокоэластичная муфта с торообразной оболочкой.

Экономия от внедрения синхронного привода на КД по сравнению с асинхронным составляет 17 тыс. рублей в год на один горнообогатительный комбинат при сроке окупаемости дополнительных капиталовложений 1,2 года.

В третьей главе изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований статических режимов шаровых мельниц.

При каскадном режиме, как известно, полезная мощность определяется по формуле, предложенной проф. С. Е. Андреевым. Ее экспериментальная проверка в промышленных условиях показала, что между расчетными и фактическими данными имеются существенные расхождения /до 40%/.

Последнее объясняется следующим. Во-первых, при анализе каскадного режима без достаточных обоснований считается, что все дробящие тела препятствуют вращению барабана, независимо от расположения их по периферии контура. Во-вторых, коэффициент сцепления футеровки принят постоянным, независимо от геометрии реального профиля футеровки.

На основании анализа результатов экспериментов, полученных на модели шаровой мельницы, показано, что при каскадном режиме сопротивление вращению барабана оказывают только дробящие тела, поднимающиеся по круговым траекториям. С учетом этого формула полезной мощности принимает следующий вид:

$$P_n = A \gamma V \sqrt{D} \psi (0,25 + 2,84 \psi) \sin \theta, \text{ кВт}, \quad /7/$$

где A - численный коэффициент;
 γ - объемный вес дробящих тел и сырья;
 V - расчетный объем барабана;
 D - внутренний диаметр барабана;
 ψ - относительная скорость вращения барабана;
 φ - степень заполнения барабана;
 θ - угол поворота дробящей нагрузки, зависящий от ψ и φ и геометрии профиля футеровочных плит.

Для учета влияния профиля футеровочных плит из анализа усилий, действующих на поверхность барабана при каскадном режиме, найдено выражение для коэффициента сцепления футеровки:

$$K_n = \frac{(0,25 + 2,84 \varphi) \sin \theta}{4,45 \psi^2 \varphi + (0,17 + 3,74) \cos \theta} \quad /8/$$

С другой стороны коэффициент сцепления футеровки определяется действительным коэффициентом трения шаров о футеровку и геометрией профиля футеровки

$$K_n' = \frac{K_{тр} + \operatorname{tg} \alpha_{\varphi}}{1 - K_{тр} \operatorname{tg} \alpha_{\varphi}}, \quad /9/$$

где $K_{тр}$ - действительный коэффициент трения шаров о футеровку;

α_ϕ - угол, образованный нормалью к радиусу барабана и касательной к поверхности футеровки.

Формулы /8/ и /9/ дают возможность учесть влияние конструктивных параметров футеровки на мощность электропривода ШМ и позволяют достаточно точно определить коэффициент трения между дробящими телами и стальной футеровкой.

Для определения полезной мощности мельницы при водопадном режиме ее работы предложено несколько методов, основанных на теории Дэвиса. Согласно этой теории, при отсутствии скольжения дробящих тел о футеровку в зависимости от параметров скоростного режима контур дробящих тел принимает определенное фиксированное положение. Из этого следует, что при водопадном режиме необходимо знать условия, при которых скольжение отсутствует. Из всех известных методов определения полезной мощности экспериментальной проверке подвергся только графоаналитический метод, предложенный проф. Д.К. Крюковым.

В работе показано, что метод Д.К. Крюкова является графической интерпретацией формулы проф. Н.П. Неронова.

На основе теории Дэвиса получена формула для вычисления необходимого коэффициента сцепления футеровки при водопадном режиме:

$$K_n = \frac{1 - K^2 - \frac{2}{3}\psi^2(1 - K^2)}{\frac{2}{3}\pi(1 - K^3) - \frac{4}{3}(\arccos\psi^2 - K^3 \arccos K\psi^2) + \frac{16 + 23\psi^4 + 36\psi^6}{45\psi^6}(1 - \psi^4)^{95} - \dots - \frac{16 + 23K^2\psi^4 - 54K^2\psi^6 + 90K^4\psi^6}{45\psi^6}(1 - K^2\psi^4)^{95}}, \quad /10/$$

где K - относительный радиус.

Условие отсутствия скольжения соблюдается при $K_n \leq K'_n$. Для реализации этого условия необходима криволинейная поверхность

футеровки, описываемая уравнением логарифмической спирали.

На основании сравнительного теоретического анализа стандартных профилей футеровки /волнистые, ступенчатые/ в работе показано, что коэффициенты сцепления K'_n этих футеровок близки к величинам необходимого коэффициента сцепления. Этим, в частности, объясняется удовлетворительное совпадение расчетных /по формуле Неронова/ и экспериментальных значений мощности на валу электропривода.

Одним из основных параметров, принятых в теории Дэвиса, является относительный радиус, определяемый на основании формулы Кантаровича-Осецкого. В настоящей работе для вычисления этого параметра предлагается более простая приближенная формула, справедливая на всем возможном интервале изменения параметров скоростного режима:

$$K = \psi^{-1} [\psi(\psi^2 - 1,245\psi)]^{\frac{1}{3}}. \quad /11/$$

Эта формула позволила дать более удобное выражение для определения полезной мощности при водопадном режиме:

$$P_n = \gamma V \sqrt{D} [\psi^3(3 + 3,1\psi^2 - 4,98\psi^4\psi) - (3\psi^2 - 3,735\psi) \sqrt{\psi(\psi^2 - 1,245\psi)}], \text{ кВт.} \quad /12/$$

В целях повышения эффективности процесса измельчения необходимо, чтобы ШМ работали в оптимальном режиме, при котором приведенные затраты на единицу производимой продукции минимальны. В данной работе на основе использования методов теории подобия предложено критериальное уравнение для определения оптимальной скорости вращения барабана. Перевод стержневых мельниц Дзезкаганского ГМК на работу с оптимальной скоростью вращения барабана позволил снизить эксплуатационные расходы на 30 тыс. рублей в год.

В четвертой главе изложены результаты теоретических и экс-

периментальных исследований переходных процессов в электроприводе ШМ при пуске.

На основании анализа диаграмм тока прямой последовательности СД мельниц показано, что при пуске этих двигателей можно пренебречь влиянием одноосного эффекта обмотки возбуждения даже при закорачивании ее.

Точное аналитическое решение уравнения движения электропривода ШМ при пуске невозможно вследствие нелинейности механических характеристик двигателя и зависимости статического момента на валу мельницы от угла поворота барабана. В настоящей работе для решения этого уравнения предлагается простой аналитический метод, основанный на кусочно-линейной аппроксимации статического момента и механической характеристики двигателя.

Анализ результатов расчета, полученных по этой методике, показывает весьма удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных. При этом установлено, что:

завышение номинальной мощности электропривода ШМ по условиям пуска нецелесообразно, а это позволит снизить капитальные затраты на электрооборудование ШМ в размере 300-375 тыс. рублей в пересчете на один горнообогатительный комбинат;

наиболее рациональными значениями параметров пусковой характеристики СД мельниц являются - пусковой момент $/1,3-1,4/M_n$, входной момент $1,1 M_n$.

На основе анализа дифференциального уравнения движения привода при вхождении СД в синхронизм предложена формула, позволяющая определить минимальный ток возбуждения, при котором двигатель успешно втягивается в синхронизм.

Пятая глава посвящена исследованию рациональных режимов

возбуждения СД мельниц и изысканию способов повышения технико-экономических показателей систем возбуждения.

Важнейшей особенностью синхронного электропривода является возможность регулирования режима реактивной мощности путем изменения тока возбуждения. При этом происходит перераспределение потерь электроэнергии в двигателе и питающей сети.

На основании минимизации выражения приведенных затрат на компенсацию реактивной мощности предложены формулы для вычисления рациональных значений реактивной мощности СД:

$$\alpha_{\text{опт}} = \frac{p_k Q_{\text{сн}} - B Z_3 T}{2 A Z_3 T} \quad / \text{если } Q_{\text{к.опт}} > 0 / \quad /13/$$

и

$$\alpha_{\text{опт}} = \frac{\lambda Q_{\text{сн}} - B}{2 A} \quad / \text{если } Q_{\text{к.опт}} \leq 0 / \quad /14/$$

где $\alpha_{\text{опт}}$ - оптимальное значение реактивной мощности СД в относительных единицах;

p_k - приведенные затраты на выработку реактивной мощности косинусными конденсаторами;

$Q_{\text{сн}}$ - номинальное значение реактивной мощности СД;

A, B - составляющие потерь в СД, пропорциональные соответственно квадрату и первой степени его реактивной мощности;

Z_3 - стоимость потерь электроэнергии;

T - число часов работы СД в год;

λ - приведенные затраты на выработку 1 квар в узле нагрузки;

$Q_{\text{к.опт}}$ - оптимальное значение реактивной мощности конденсаторов.

Анализ формул /I3/ и /I4/ показывает, что рациональным режимом возбуждения СД мельниц для большинства энергосистем Союза является работа с недоиспользованием компенсирующей способности ($\alpha_{\text{ст}} \approx 0$), т.е. со сниженными против номинальных значений токами возбуждения.

На основании экспериментальных данных и теоретического анализа доказана возможность устойчивой работы синхронного привода ШМ в статических режимах при рациональных токах возбуждения.

Для обеспечения необходимого запаса статической устойчивости узла нагрузки рациональные токи возбуждения должны быть такими, при которых критическое напряжение не достигает предельного. Используя известный критерий устойчивости узлов нагрузки и разложение составляющих этого критерия в ряд Тейлора, в работе предложено аналитическое выражение, позволяющее определить критическое напряжение в узле нагрузки с учетом возможного изменения режима возбуждения СД:

$$U_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{\left[3,51Q_a + \sum_i \frac{Q_{\text{сн}i}(0,54b_i c_i - c_i^2)}{a_i(0,36b_i - c_i)^{3/2}}\right]X + Pr}{\left\{5,65Q_a + \sum_i \frac{Q_{\text{сн}i}\left[1 + \frac{0,5b_i c_i}{(0,36b_i - c_i)^{3/2}}\right] - \frac{U_n}{X_k}}{a_i}\right\}X - U_n}}, \quad /I5/$$

- где Q_a - реактивная мощность, потребляемая асинхронной нагрузкой;
 r, X - соответственно активное и индуктивное сопротивления питающей линии;
 P - активная мощность, потребляемая узлом нагрузки;
 X_k - реактивное сопротивление косинусных конденсаторов;
 m - число СД;
 U_n - номинальное напряжение узла нагрузки;

a_i, b_i, c_i - коэффициенты, зависящие от параметров и режима работы СД.

Результаты расчетов по формуле /I5/ показывают, что снижение токов возбуждения СД мельниц до рациональных величин не значительно снижает запас устойчивости узла нагрузки /не более 2%/.

Экономия от внедрения рациональных режимов возбуждения СД мельниц составляет 360-720 руб. в год на один агрегат без дополнительных капиталовложений.

Режим электропотребления любого узла нагрузки характеризуется определенной динамичностью. С учетом этого в работе предлагается формула для оценки дополнительного экономического эффекта от реализации автоматического регулирования возбуждения СД по сравнению с работой при постоянных рациональных токах возбуждения:

$$\Delta Z = \left(1 - \frac{A}{A + EnQ_{\text{аср}}^2}\right) \frac{EQ_{\text{аср}}^2}{S_3} \left[ak_m^2 + bTk_\varphi^2 - \frac{(ak_m + bT)^2}{S_3}\right], \quad /I6/$$

где $S_3 = a + bT$ - стоимость потерь электроэнергии;

a - стоимость 1 квт в час максимума энергосистемы;

b - стоимость одного квт. час электроэнергии;

$Q_{\text{аср}}$ - среднее значение реактивной мощности асинхронной нагрузки;

k_m - коэффициент максимума реактивной мощности асинхронной нагрузки;

k_φ - коэффициент формы графика реактивной мощности.

Расчеты по выражению /I6/ для конкретных узлов нагрузки обогатительных фабрик показывают, что реализация автоматического регулирования возбуждения СД мельниц по оптимальному закону

целесообразна, если затраты на устройства АРВ не превышают 50 рублей.

В свете наметившейся тенденции - замены электромашинных возбуждателей СД статическими на базе кремниевых управляемых вентилей - важное место занимают вопросы повышения технико-экономических показателей статических систем возбуждения СД мельниц. Необходимость форсировки возбуждения вынуждает работу возбуждателя при установившемся режиме с большими углами открытия вентилей, что приводит к значительному увеличению потребления реактивной мощности и соответствующему увеличению габаритной мощности силового трансформатора. Для уменьшения потребления реактивной мощности возбуждателем и снижения габаритной мощности его трансформатора в работе предложено осуществлять форсировку возбуждения СД при аварийных режимах переключением первичной обмотки трансформатора. Однако, такой способ форсировки увеличивает время запаздывания.

На основании сравнительного теоретического анализа переходных процессов при внезапных понижениях напряжения на эл.машинах СД показано, что осуществление форсировки возбуждения переключением не снижает динамической устойчивости привода по сравнению с возбуждением СД от электромашинных возбуждателей.

С учетом предложенного способа форсировки в работе дана методика расчета силового трансформатора статического возбуждателя.

Экономия от внедрения предложенных рекомендаций составляет около 110 рублей в год на один возбуждательный агрегат.

Принимая во внимание возможность осуществления рациональных режимов возбуждения СД мельниц в работе показана целесообразность увеличения нагрузки на валу приводных двигателей выше номиналь-

ной мощности /на 11% при $\cos \varphi_n = 0,9$ и на 25% при $\cos \varphi_n = 0,8/$ и предложены способы повышения нагрузки.

Основные результаты работы

1. На основании анализа нагрузочных осциллограмм электропривода КД показано, что последние можно аппроксимировать гармоническими функциями, при этом режимы электропривода необходимо рассматривать с учетом влияния упругих звеньев.

2. Разработана методика анализа режимов работы электропривода с упругими связями при изменении статического момента по гармоническому закону.

3. В целях создания рациональной системы электропривода КД проведено исследование по выявлению возможности и целесообразности замены асинхронных электроприводов синхронными, на основании которых установлено, что наиболее эффективным способом обеспечения устойчивой работы СД дробилок /демпфирование колебаний/ является метод, основанный на использовании демпфирующих свойств соединительной упругой муфты. Отказ от практики комплектования КД среднего и мелкого дробления асинхронными двигателями позволит получить экономию в размере 17 тыс. рублей в год на один горнообогатительный комбинат при сроке окупаемости дополнительных капиталовложений 1,2 года.

4. Исследования статических режимов ШМ позволили уточнить методический подход к определению полезной мощности. Получены более удобные формулы для расчета полезной мощности, позволяющие учесть влияние профиля футеровочных плит, не прибегая к интерполяции табличных зависимостей или графическим построениям.

5. Предложена методика определения оптимальной скорости вра-

щения барабана для промышленных ШМ. На примере Джезказганского ГМК показано, что перевод только стержневых мельниц в оптимальный режим дает снижение эксплуатационных расходов на 30 тыс. рублей в год. Это позволяет сделать вывод о целесообразности широкого проведения исследований в области оптимизации режимов работы ШМ.

6. На основании анализа диаграмм тока прямой последовательности установлено, что асинхронный момент СД мельниц практически не имеет провала в области половины синхронной скорости. Это свидетельствует о целесообразности повсеместного внедрения глухого подключения возбuditелей.

7. Разработан простой аналитический метод расчета переходных процессов электропривода ШМ, на основе которого показано, что:

- завышение номинальной мощности электропривода ШМ по условиям пуска нецелесообразно. Это позволит снизить капитальные затраты на электрооборудование ШМ на 300-375 тыс. руб. эй в расчете на один горнообогатительный комбинат;

- наиболее рациональные значения пусковых характеристик СД мельниц составляют - пусковой момент $/1,3-1,4/M_n$, входной момент $I, I M_n$;

8. Разработан рациональный режим возбуждения СД мельниц. Для большинства энергосистем Союза рациональным режимом возбуждения СД мельниц является работа с недоиспользованием компенсирующей способности с $\cos \varphi = 1$. Это позволяет сделать вывод о целесообразности изготовления синхронных двигателей для ШМ с номинальным коэффициентом мощности, равным единице.

Внедрение рациональных режимов возбуждения СД на действующ-

щих предприятиях дает экономию в размере 360-720 рублей в год на один агрегат без дополнительных капиталовложений.

9. Предложена простая формула для расчета запаса статической устойчивости узлов нагрузки, позволяющая учесть изменение режима возбуждения СД.

10. Разработана методика по определению экономической эффективности автоматического регулирования возбуждения СД, обеспечивающего минимум потерь на компенсацию реактивной мощности в узле нагрузки.

11. Предложены мероприятия по повышению технико-экономических показателей статических систем возбуждения мельниц, обеспечивающие экономию в размере 110 рублей в год на один агрегат.

12. Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод о возможности увеличения нагрузки на валу СД мельниц выше номинальной.

Материалы диссертации были доложены:

1. На научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития полупроводникового возбуждения синхронных двигателей", Свердловск, 1966.

2. На юбилейной конференции электротехнического факультета Красноярского политехнического института, Красноярск, 1967.

3. На пятой и шестой научно-технических конференциях по вопросам автоматизации производства, Томск, 1967, 1969.

4. На семинаре кафедры электрификации горных предприятий Московского горного института. Москва, 1969.

5. На втором Всесоюзном совещании по экономии электроэнергии на предприятиях цветной металлургии, Красноярск, 1970.

Основные положения и выводы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Морозов Е.Ф., Туханов Ю.М. Об оптимальном режиме работы синхронных электродвигателей шаровых мельниц. "Цветная металлургия", № 8, 1967.

2. Туханов Ю.М., Морозов Е.Ф. Оптимизация режима и схемы возбуждения синхронных двигателей шаровых мельниц. Сб. "Автоматизация электроприводов и оптимизация режимов электропотребления", Красноярск, 1967.

3. Трошин В.А., Лыков Н.Б., Морозов Е.Ф. К расчету устойчивости синхронного двигателя при возбуждении от неуправляемого статического преобразователя. Сб. "Автоматизация электроприводов и оптимизация режимов электропотребления". Красноярск, 1967.

4. Никулин И.А., Трошин В.А., Архипенко В.В., Морозов Е.Ф. Рациональное использование синхронных электроприводов на обогащательных фабриках. "Цветная металлургия", № 9, 1969.

5. Морозов Е.Ф. Упрощенные формулы для определения полезной мощности шаровых мельниц, "Торный журнал", № 12, 1969.

6. Морозов Е.Ф., Трошин В.А. О выборе типа электропривода для механизмов с нерегулируемой скоростью на горнообогатительных предприятиях. Сб. "Оптимизация режимов электропотребления и систем электроснабжения на предприятиях цветной металлургии", Изд-во "Металлургия", 1969.

7. Морозов Е.Ф. Оптимизация режима работы электропривода стержневой мельницы МСЦ-32-45, Сб. "Оптимизация режимов электропотребления и систем электроснабжения на предприятиях цветной металлургии", Изд-во "Металлургия", 1969.

8. Морозов Е.Ф. К вопросу влияния режимов возбуждения тихо-

ходных синхронных двигателей на устойчивость узлов нагрузки, ИВУЗ "Энергетика" № 10, 1970.

9. Морозов Е.Ф. Влияние типа возбудителя на переходные процессы в синхронном двигателе при внезапных изменениях напряжения сети, ИВУЗ, "Энергетика", № 7, 1970.

10. Морозов Е.Ф. О синхронном электроприводе конусных дробилок вторичного дробления, "Электричество", № 10, 1970.

11. Морозов Е.Ф. Аналитический метод выбора профиля футеровочных плит шаровых мельниц при водопадном режиме, ИВУЗ "Торный журнал", № 1, 1971.

12. Никулин И.А., Трошин В.А., Архипенко В.В., Кунгс Я.А., Литвер В.Е., Морозов Е.Ф. Вопросы оптимизации режимов электропотребления на предприятиях цветной металлургии. Информационный доклад Общества инженеров металлургической промышленности в Польше на VI Международной конференции по промышленной энергетике в г. Варна /Болгарская народная республика/, 1969.

13. Никулин И.А., Трошин В.А., Архипенко В.В., Морозов Е.Ф. Методика выбора и размещения компенсирующих средств на промышленных предприятиях с непрерывным технологическим процессом, "Промышленная энергетика", № 4, 1970.

14. Трошин В.А., Морозов Е.Ф., Петров В.М. О сравнении синхронных и асинхронных двигателей. Сборник научных статей электротехнического факультета КПИ, Красноярск, 1970.

15. Морозов Е.Ф., Трошин В.А. О допустимом снижении тока возбуждения синхронных двигателей по условию вхождения в синхронизм. Сборник научных статей электротехнического факультета КПИ, Красноярск, 1970.

16. Морозов Е.Ф. К вопросу выбора мощности электропривода

шаровых мельниц. Сборник научных статей электротехнического факультета КПИ, Красноярск, 1970.

17. Морозов Е.Ф. О выборе мощности электропривода шаровой мельницы при каскадном режиме. Сборник научных статей электротехнического факультета КПИ, Красноярск, 1970.

18. Морозов Е.Ф. Динамика электроприводов с упругими связями при изменении нагрузки по гармоническому закону. Сборник научных статей электротехнического факультета КПИ, Красноярск, 1970.