

УДК 921.726

Г.Г. Пивняк, акад. НАН України

В.И. Кириченко, П.И. Пилов, д-ра техн. наук,

В.В. Кириченко, В.А. Бородай, кандидаты техн. наук,

Р.А. Боровик, В.В. Барабан

(Украина, Днепропетровск, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»)

ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

ВСТУПЛЕНИЕ

На горно-обогатительных комбинатах Украины расходуется до 20% всей электроэнергии страны, из них до 70% – на операцию измельчения. Одна из причин – это низкий (0,4-2%) КПД традиционных барабанных мельниц. Удельный расход электроэнергии на измельчение в зависимости от свойств сырья составляет 14-21,7 кВт·ч/т. При мощности комбината 40 млн т в год необходимое количество электроэнергии составляет порядка 800 млн кВт·ч при годовой потребности в шарах около 60, а футеровки – 4 тыс. т. На сегодня эти расходы составляют до \$ 60 млн, из которых половина – за потребляемую электроэнергию. При общей массе мельниц до 15 тыс. т их стоимость близка до \$ 53 млн и она непрерывно увеличивается. Следовательно, поиск и внедрение эффективных направлений экономии материальных и энергетических ресурсов приобретают стратегическое значение, непосредственно определяя конкурентоспособность предприятий ГМК.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИИ РЕСУРСОВ

Анализ условий использования измельчительного оборудования указывает на значительное количество факторов, непосредственно влияющих на удельный расход энергии и ресурсов на единицу продукции. В числе важнейших факторов можно отметить способ передачи энергии от привода барабану, а от него – измельчаемому сырью, использование или отсутствие в мельнице металлических измельчающих тел и эффективность защиты рабочей поверхности барабана от износа, относительная скорость вращения мельницы и режим работы ее внутримельничной загрузки, энергетика разрушения сырья, запас установленной мощности привода и его тип. В целом можно утверждать, что перспективные направления экономии ресурсов должны базироваться на усовершенствовании конструкции измельчительного оборудования, технологии измельчения и режимов использования барабанных мельниц, разработке более совершенных их электроприводов. Рассмотрим перспективность этих направлений по отдельности.

Передача энергии от барабана измельчаемому сырью сопровождается ее потерями на износ шаров (при их использовании) и рабочих поверхностей мельницы, в том числе футеровки барабана, питающих и разгрузочных устройств мельницы. В мельницах с мелющими шарами удельный расход энергии на их износ уменьшают, поддерживая в барабане оптимальное соотношение сырьё/шары и рациональный гранулометрический состав шаров, оптимизируя размер и материал, водный и, по возможности, скоростной режим мельницы. Износ футеровки барабана снижают использованием ее самозащитных профилей, приданием ей магнитных свойств. Для экономии 15-19% энергии применяют близкий до «квадратного» профиль футеровки, оптимизируют соотношение между крупностью дробления и измельчения, плотность пульпы, циркуляционную нагрузку, количество стадий измельчения и частоту вращения мельниц. Разработчики прогнозируют уменьшение расхода энергии на измельчение непрочных и мелких материалов при эксплуатации башенных мельниц, оптимизации режима разрушения, в том числе дроблением сырья в валковых дробилках с развитием давления на сырьё последовательно в разных направлениях до 50-250 МПа перед операцией измельчения (по информации производителей таких дробилок их применение снижает удельный расход энергии на измельчение до 71-80%).

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Желание совместить в одной преимущества перечисленных выше направлений конструкции и режимов работы барабанных мельниц обусловило разработку в Национальном горном университете (НГУ, Украина) нового типа измельчительного оборудования – ресурсосберегающей мельницы принудительного самоизмельчения (рис. 1).

При разработке мельницы использованы следующие положения, а именно: необходимость увеличения удельной полезной мощности и переход на самоизмельчение, принудительное интенсивное сжатие сырья в различных направлениях и перенесение

работы разрушения во внутренние слои сырья благодаря усилению эффекта поперечной сегрегации загрузки барабана и оптимизации режима измельчения, исключение скольжения материала относительно рабочих поверхностей мельницы и повышенные частоты вращения барабана, оптимизация типа и режимов работы привода мельниц. Комплексное использование указанных положений обеспечивает более полное раскрытие полезного компонента, снижает удельный расход металла и энергии на единицу конечного продукта.

Повышение удельной полезной мощности достигается размещением внутри барабана вращающегося интенсификатора, рабочую поверхность кото-

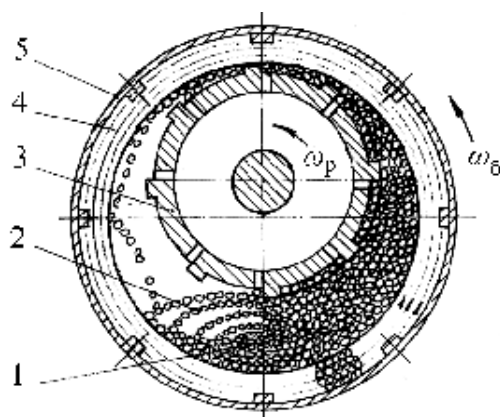


Рис. 1. Поперечный разрез ресурсосберегающей мельницы принудительного самоизмельчения

рого от износа защищают крупные куски сырья. Для принудительной сегрегации мельничной загрузки барабан мельницы оснащен футеровкой переменной жесткости. В мельнице осуществляется многовекторное интенсивное сжатие, раздавливание, скалывание и истирание сырья, что обеспечивает селективность измельчения и получение большей полезной мощности. А из-за того, что вся работа разрушения выполняется в одном барабане мельницы, необходимость в использовании дополнительного дробильного оборудования отпадает. Конструктивные и режимные особенности позволяют увеличить межремонтный срок новой мельницы, дают возможность регулировать и автоматизировать процесс измельчения. Новая мельница может работать с обычными и повышенными скоростями, обеспечивает перенесение основной энергии измельчения во внутренние слои, разрушение сырья с желаемым соотношением раздавливания, истирания и удара. Она может работать также без и с использованием дробящих тел, в мокром и сухом, открытом и частично замкнутом режиме без использования спирального классификатора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Установлено, что повышенное давление на внутримельничную загрузку шаровой мельницы для измельчения угля увеличивает производительность тепловой электростанции и снижает удельный расход энергии в два раза. В мокром цикле принудительного самоизмельчения руды с содержанием золота и прочностью до 18 единиц по шкале Протодяконова удельный расход электроэнергии составил 16 кВт·ч/т при уменьшении в 4 раза удельного расхода футеровки. Измельчение андезитовой руды с содержанием алмазов указало на повышенную сохранность их природной формы. При мокром измельчении промпродуктов достигнута экономия 45% электроэнергии. При сухом принудительном измельчении талька удельный расход энергии по готовому снизился вдвое, а объем барабана уменьшился – в 6 раз. Принудительное измельчение с целью получения графита для электротехнической промышленности снизило удельный расход энергии на 81%. При измельчении дробленого диопсида удельные энергозатраты уменьшились втрое. В режиме принудительного измельчения обезвоженного мела содержание классов -16, 9 и 3 мкм в готовом продукте составило 100, 96,1 и 54% соответственно при удельной поверхности готового продукта 0,83 м²/г. При мокром помоле железорудных материалов ОАО «Ингулецкий ГОК» установлено, что при достижении идентичных показателей обогащения при принудительном одностадиальном самоизмельчении по сравнению с трехстадиальным шаровым снижением удельных энергозатрат составило около 23,3%, содержание железа в концентрате превысило 0,85%, а выход концентрата – 1,08%. И это только за счет оптимизации технологии разрушения. Сделан вывод, что даже при одностадиальном помоле можно получить более качественные концентраты при более грубом помоле исходной руды. При этом одностадиальное принудительное самоизмельчение позволит использовать более упрощенную, малооперационную технологическую схему и существенно снизит себестоимость передела и концентрата. Ожидается, что

дополнительная экономия будет получена за счет удаления потерь энергии на износ шаров вследствие их исключения, а также на износ футеровок мельницы благодаря переносу основной работы разрушения во внутренние слои измельчаемого сырья из-за усиления эффекта самофутерования рабочих поверхностей измельчаемым материалом. Преимущества новой мельницы – это сокращение количества стадий дробления, уменьшение площади и объемов производственных помещений с соответствующей экономией средств на их обслуживание.

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Перспективные направления ресурсосбережения средствами электропривода включают экономию электроэнергии за счет оптимизации режима работы привода, снижения его стоимости путем уменьшения запаса установленной мощности двигателя, экономии от повышения коэффициента использования мельницы за счет роста надежности привода. Большинство мощных барабанных мельниц укомплектовано синхронными двигателями, номинальная мощность которых нередко превышает потребляемую в длительном режиме на 15-30% и даже больше, хотя при существенном недоиспользовании по мощности КПД двигателя снижается, а цена привода возрастает. Такое положение обусловлено рядом причин, в том числе трудностями определения полезной мощности мельниц и разными условиями их использования при измельчении различных материалов, проблемами обеспечения надежности реакторного пуска мощных двигателей в условиях слабых сетей. Именно поэтому один из резервов экономии электрической энергии заключается в обеспечении возможно лучшего соотношения мощностей длительного и номинального режимов работы двигателей. Решение этой проблемы – в расширении номенклатуры типовых размеров мельниц и синхронных двигателей для их использования в наиболее рациональных энергетических режимах.

Рассматривая проблему энерго- и ресурсосбережения в процессах измельчения следует учитывать сложившиеся соотношения цен электрооборудования и механоизделий, а именно, цена тонны первых практически втрое превышает цену вторых, т. е. при создании измельчительных комплексов нового поколения следует учитывать этот ценовой фактор, стремясь к уменьшению отношения массы электрооборудования к общей массе комплекса. При этом дополнительные преимущества от того, что номинальный КПД двигателей при увеличении номинальной скорости на 1000 об/мин возрастает в среднем на 1,9%. А это потенциальная возможность роста общего КПД привода и мельницы даже при использовании промежуточных редукторов, что подтверждается в практике зарубежных фирм, т. е. дополнительно снизить удельный энергетический расход на измельчение возможно заменой тихоходных синхронных приводов на быстроходные с промежуточными редукторами. При этом применение мельниц со сверхкритическими скоростями позволит уменьшить передаточное число и массу редукторов.

Еще один резерв экономии средств – оптимизация системы возбуждения синхронных двигателей путем программного управления реверсивным возбу-

дителя с целью максимизации средней составляющей электромагнитного момента в асинхронных режимах. В существующих приводах это позволяет или более полно использовать мощность имеющегося двигателя, или же возможность использовать для мельниц двигателя меньшей мощности. К тому же, благодаря специальному регулированию тока возбуждения существенно снижается коэффициент динамичности зубчатого зацепления при пуске и синхронизации. Дополнительные резервы заключаются в усилении пусковой обмотки, оптимизации и регулировании разрядного сопротивления в цепи возбуждения при программном управлении реверсивным возбудителем. На рис. 2 приведены пусковые механические характеристики синхронного двигателя СДМ32-24-59-80УХЛ4 мощностью 4 МВт, полученные из нелинейной математической модели, которая учитывает нагрев обмоток СД и насыщение его магнитных цепей.

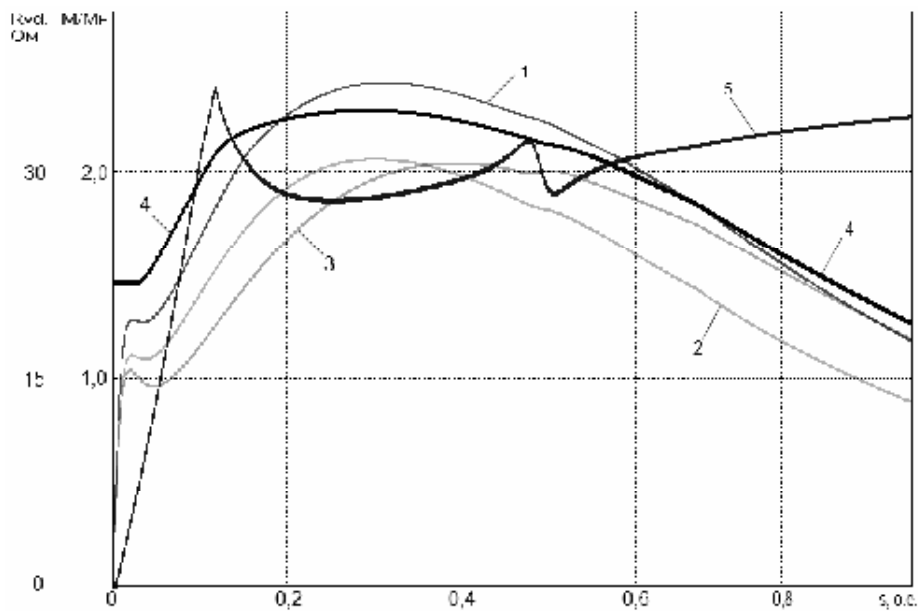


Рис. 2. Кривые пусковых механических характеристик СДМ32-24-59-80УХЛ4 (4 МВт)

Кривая 1 соответствует естественной механической характеристике выбранного синхронного двигателя при заводских параметрах и номинальном напряжении сети. При реакторном пуске (кривая 2) снижение напряжения сети на 15% существенно ухудшает среднюю составляющую электромагнитного момента на всем участке разгона, причем уровень пускового момента стал таким, что не удастся обеспечить успешный запуск двигателя. Это можно выполнить путем увеличения активного сопротивления пусковой обмотки (кривая 3), однако одновременно с этим снижается входной момент. Для решения этой проблемы возможно использование программно управляемого возбудителя в сочетании с регулированием разрядного сопротивления в функции скольжения с учетом необходимости ограничивать напряжение на обмотке возбуждения допустимым уровнем. Такой подход даже при сниженном напряжении на статоре двигателя обеспечивает успешную синхронизацию СД. Причем, средний момент (кривая 4) на некоторых участках скольжения становится больше момента естественной характеристики

двигателя. Расчетный желаемый характер изменения разрядного сопротивления в процессе пуска с учетом ограничения напряжения на обмотке возбуждения иллюстрирует кривая 5.

Перспективно и использование знакопеременного тока возбуждения для стабилизации момента в зубчатом зацеплении с целью увеличения срока его службы. И хотя при этом использование форсированных уровней тока возбуждения приводит к насыщению магнитной цепи машины, однако за счет того, что одновременно снижается и сопротивление реакции якоря по продольной оси, перегрузочная способность двигателя сохраняется, хотя жесткость угловой характеристики несколько снижается. С соответствующим влиянием на возможности управления моментом двигателя (рис. 3). Здесь кривые 1, 3 – без учета, а 2 и 4 – с учетом насыщения магнитной цепи машины.

Таким образом, лишь за счет оптимизации установленной мощности приводного двигателя и режимов работы его системы возбуждения возможно на 10-15% снизить установленную мощность и стоимость привода.

Еще один резерв снижения запаса установленной мощности привода – использование резонансных явлений в обмотке ротора при пуске двигателя. Сущность состоит в незначительной реконструкции полусной системы, что позволяет увеличить асинхронный момент двигателя в заданной зоне скольжений. Благодаря такой модернизации полюсной системы ротора исключается необходимость в предварительной выхаживании мельницы перед остановкой и ее последующем разгоне до выхода на установившийся режим, что экономически важно для предприятия.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕЛЬНИЦ

С целью определения экономических перспектив промышленного освоения измельчительного комплекса на основе мельниц МПС и нового типа комплектного синхронного привода установлены следующие преимущества. В частности, для ОАО «Михайловский горно-обогатительный комбинат» (Россия) сотрудниками НГУ разработано техническое задание, а ЗАО «НКМЗ» – техниче-

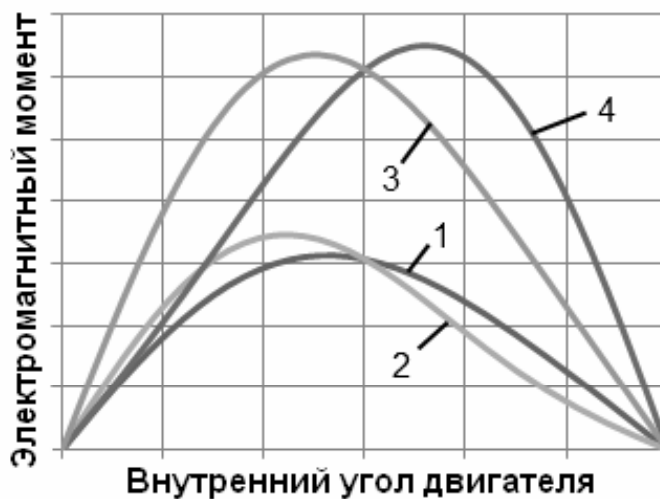


Рис. 3. Кривые угловых характеристик СДМ32-24-59-80УХЛ4 мощностью 4 МВт при номинальном (кривые 1, 2) и двукратном (кривые 3, 4) токе возбуждения

ский проект на создание мельницы МПС(Р)-3600х3100. Мельница предназначена для замены универсальной шаровой мельницы МШРГУ-4500х6000. Для новой мельницы мощностью 2500 кВт использован привод с существующей. При этом загрузка мельницы осуществляется при помощи улиткового питателя, а разгрузка – спиральных элеваторов с решеткой. Привод рабочих поверхностей мельницы – групповой, с использованием механического каскада с открытой зубчатой передачей. Применение предлагаемой мельницы обеспечит годовой экономический эффект \$ 0,85 млн при сроке окупаемости 1,5 года. Дополнительные преимущества – усовершенствование ее синхронного электропривода путем использования перечисленных выше предложений.

Для оценки преимуществ от замены двух рудногалечных мельниц МГР-4000-7500 на МПС(Р)-3600х3100А (рис. 4) в НГУ выполнен расчет ожидаемого экономического эффекта.

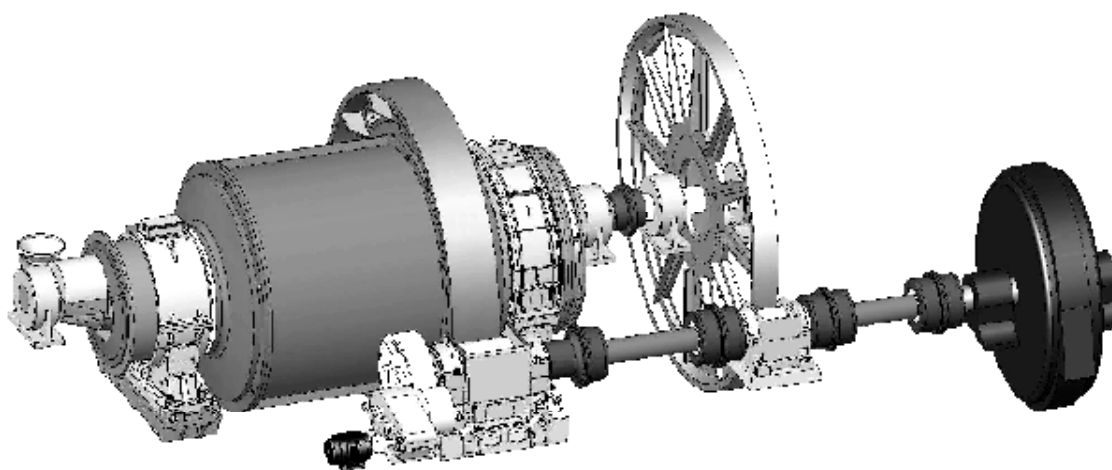


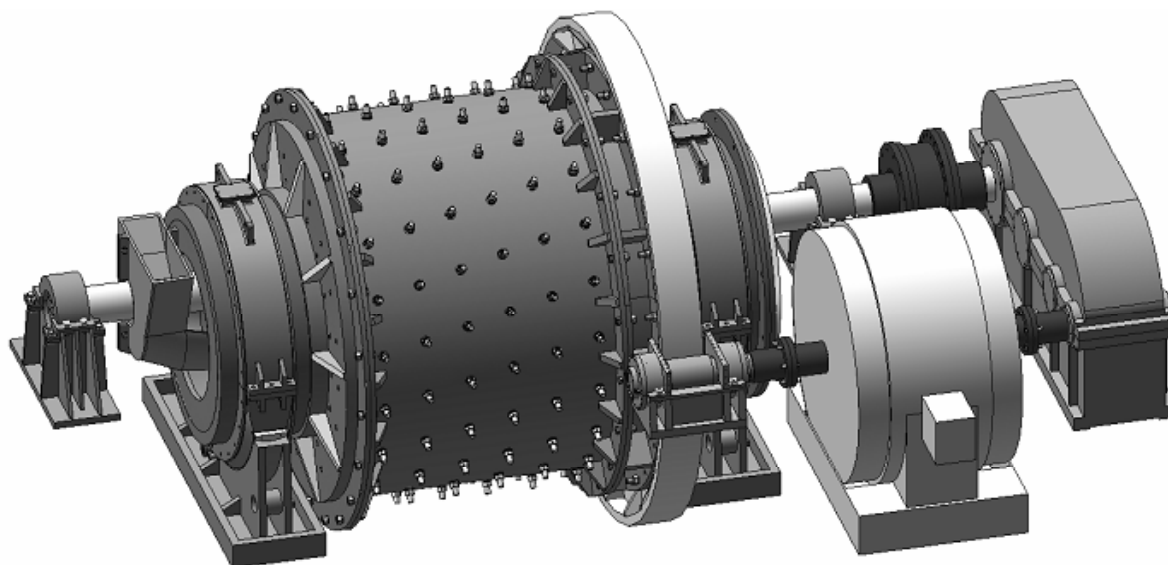
Рис. 4. Общий вид ресурсосберегающей мельницы принудительного самоизмельчения МПС(Р)-3600х3100А, адаптированной к фундаментам заменяемых мельниц МГР-4000-7500 Ингулецкого ГОК (г. Кривой Рог)

Использование мельницы МПС(Р)-3600х3100А для доизмельчения пром-продуктов взамен двух рудногалечных мельниц МГР-4000-7500 на ОАО «ИнГок» обеспечит годовой экономический эффект в размере \$ 0,86 млн при сроке окупаемости 3,6 года даже при увеличении на 60% цены тонны новой мельницы по сравнению с ценой серийных мельниц. При одинаковой цене экономический эффект возрастает до \$ 1,25 млн, а срок окупаемости снижается до 1,7 года. Мельница максимально адаптирована к фундаментам мельницы МГР-4000-7500 и ее технологическому оборудованию. К преимуществам мельницы следует отнести уменьшение массы вдвое, удельных расходов футеровки – вчетверо, объема – в пять раз и удельного расхода электроэнергии не ниже 16%. Питание осуществляется через загрузочную воронку и подающие спирали передней цапфы, разгрузка – с помощью бутары. Привод мельницы – групповой, с механическим каскадом.

К тому же выполнено технико-экономическое обоснование и определен экономический эффект от применения мельницы МПС(Р)-3600х3100 вместо

секции из трех шаровых мельниц, установленных на ОАО «Ингулецкий ГОК», который составил \$ 2,6 млн при сроке окупаемости 2 года.

Для проверки эффективности разработанных мельниц в НГУ разработано техническое задание на экспериментальную мельницу МПС-2100x1500 с установленной мощностью группового привода 315 кВт. Общий вид мельницы и ее техническая характеристика приведены на рис. 5.



Техническая характеристика

Объем барабана	5,6 м ³
Частота вращения	35,7 об/мин
Мощность двигателя	315 кВт
Масса мельницы без привода	43 т
Производительность по исходному питанию	до 20 т/ч
Крупность исходного питания	минус 30 мм
Циркуляционная нагрузка	не выше 6
Габариты: длина x ширина x высота	6180 x 4020 x 2885

Рис. 5. Общий вид и техническая характеристика ресурсосберегающей мельницы принудительного самоизмельчения МПС(Р)-2100x1500

ВЫВОДЫ

На сегодня для предприятий горной промышленности весьма актуальна проблема энерго- и ресурсосбережения на основе использования закономерностей интенсификации и управления измельчительным оборудованием. Радикальное уменьшение энергетических и материальных расходов можно обеспечить заменой морально устаревших барабанных мельниц на более современные. Эффективным решением этой проблемы является широкое внедрение в промышленность разработанных в Национальном горном университете энергонапряженных ресурсосберегающих мельниц принудительного самоизмельчения, оснащенных современным, высокоэффективным синхронным электроприводом с микропроцессорной системой программного управления реверсивным

тиристорным возбудителем. Согласно выполненным расчетам, 1 м³ объема ба-
рабанов таких мельниц в течение года обеспечит экономию \$ 4000 благодаря
уменьшению массы, \$ 39600 – за счет исключения необходимости в использо-
вании шаров и снижения удельных расходов футеровки и \$ 1300 – благодаря
уменьшению удельного расхода электроэнергии. Дополнительная экономия на-
блюдается за счет снижения запаса установленной мощности привода и его це-
ны, исключения непродуктивных режимов выхаживания и разгона мельниц при
их плановых ремонтах или остановках, увеличения срока службы зубчатых за-
цеплений, уменьшения требуемых площадей и объемов производственных зда-
ний, сокращения технологической цепочки и количества стадий измельчения и
дробления.

УДК 621.313.17

В.И.Милых, д-р техн. наук, С.В.Ткаченко

(Украина, Харьков, НТУ «Харьковский политехнический институт»)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ КАК ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Введение. Схематически устройство линейного импульсного электродви-
гателя (ЛИЭД) представлено на рис. 1, а более полно описано в работах [1, 2].

ЛИЭД имеет подвижные ак-
тивные части – якорь 1 и реак-
тор 2, состоящие из коаксиаль-
ных цилиндрических шихто-
ванных ферромагнитных серд-
ечников и расположенных в
пазах секционированных об-
моток. Обмотки соединены по-
следовательно и получают им-
пульс тока i_s от емкостного
накопителя энергии C_E . Взаи-
модействие магнитных полей
якоря и реактора порождает
смешанные силы электроди-
намического и электромагнит-
ного происхождения F_{em} [1].

Под их воздействием якорь перемещается вниз со скоростью v_a и через опор-
ную плиту 3 передает грунту 4 импульс силы, а реактор, усиленный инерцион-
ной массой 5, отскакивает вверх со скоростью v_r .

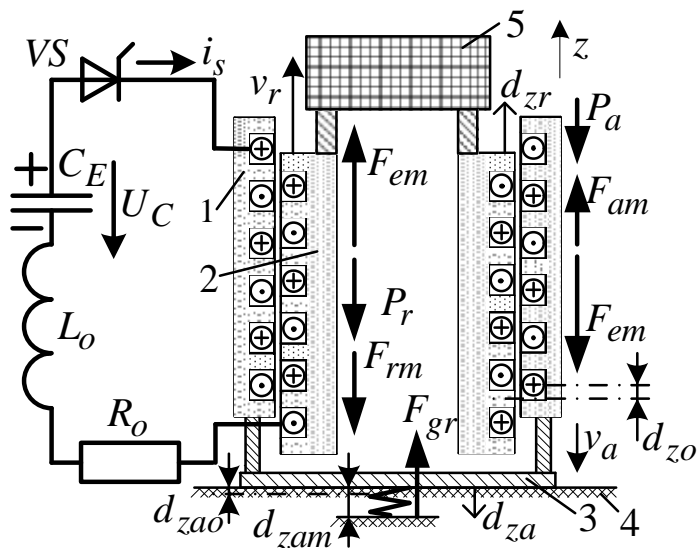


Рис. 1. Электросиловая схема ЛИЭД для определения
времени действия ударного импульса