

## Научная статья

УДК 621.313.333.2

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-20-35

Жуковский Юрий Леонидович, Малькова Яна Михайловна\*

Санкт-Петербургский горный университет

\*E-mail: s215035@stud.spmi.ru

## КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И РЕАЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕЛЬНИЦЫ

**Информация о статье**

Поступила:

02 июня 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 июля 2022 г.

Принята к печати:

04 августа 2022 г.

**Ключевые слова:**

энергоэффективность, процесс измельчения, барабанные мельницы, автоматизированный электропривод, системы управления, устойчивое развитие.

**Аннотация.**

Процесс измельчения является самым энергоемким на горно-обогатительных комбинатах. В соответствии с распределением энергетических затрат на процесс измельчения приходится более 50% всех затрат предприятия. Применение барабанных мельниц получило широкое распространение на производстве. Принцип измельчения в барабанных агрегатах не позволяет существенно снизить энергозатраты, приходящиеся на данный процесс. В статье представлена классификация способов повышения эффективности процесса измельчения, основанная на мировых практиках и исследованиях стран-лидеров по переработке руд. В рамках классификации рассмотрены алгоритмические способы повышения эффективности процесса измельчения за счет использования автоматизированного электропривода мельницы. Особое внимание уделяется внедрению усовершенствованных систем управления на базе цифрового моделирования, как одного из инструментов повышения эффективности процесса измельчения. Проведены исследования в Matlab Simulink, по результатам которых получен эффект от модификации двигательной системы управления. Разработанные алгоритмы в составе векторной системы управления электроприводом позволяют обеспечить равномерное распределение нагрузок в двухдвигательном электроприводе и снижение потребляемых токов. Применение усовершенствованных алгоритмов управления электроприводом является одним из примеров повышения энергоэффективности. Дальнейший вклад в рациональное использование энергоресурсов требует внедрения комплексных мер согласно классификации способов повышения.

**Для цитирования:** Жуковский Ю.Л., Малькова Я.М. Классификация способов повышения эффективности процесса измельчения и реализация энергоэффективных алгоритмов управления двухдвигательным электроприводом мельницы // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 4 (162). С. 20-35. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-20-35

Под воздействием глобальных вызовов в 2015 г. ООН была представлена Повестка дня, согласно которой мировому сообществу необходимо действовать в соответствии с целями устойчивого развития для построения более устойчивого мира. Повестка включает 17 целей, которых мировое сообщество должно достичь к 2030 г [1].

Переход к модели устойчивого развития напрямую зависит от доступа к современным устойчивым услугам в сфере энергетики [2,3]. Для создания таких услуг топливно-энергетический комплекс

стал претерпевать трансформацию, которая осуществляется согласно концепции 3D развития (диджитализация, декорбанализация и децентрализация) [4-6]. Однако для устойчивого развития энергосистем необходимо внедрять изменения по всей цепочке преобразования энергии, начиная с использования ископаемого топлива для ее производства и передачи и заканчивая оптимизацией ее потребления. Отсутствие или неэффективное использование цифровых технологий у потребителей приводит к отсутствию гибкости предприятий, что лиша-

ет их возможности эффективно реагировать на изменения требований рынка [7].

Горнодобывающая промышленность представляет собой широкий сегмент в мировой экономике, вовлекающий большой спектр заинтересованных сторон. С одной стороны, данная отрасль является одним из главных стрессоров, который оказывает влияние на окружающую среду, так в результате образуется множество антропогенных факторов, попадающих во все оболочки окружающей среды. С другой стороны, это одна из сфер, за счет которых и будет возможен переход к устойчивому развитию. Парадокс заключается в том, что, даже выбрав курс следования модели углеродного нейтрального развития, это подстегивает еще больший спрос на продукты горнодобывающей промышленности, которая подвержена другими локальными рисками, отличными от глобальных.

Истощение месторождений, снижение содержания полезных компонентов в составе руды, большое количество упорных руд, необходимость компаний двигаться в сторону труднодоступных, северных и отдаленных от централизованных сетей энергоснабжения регионов актуализируют тенденции энергоэффективности, ресурсосбережения и распределенной генерации для горнопромышленных компаний [8, 9].

Таким образом, в рамках сформировавшихся трендов и тенденций такие компании-гиганты, как Фосагро», «Полус», «Полиметалл» вынуждены адаптироваться к новым экономическим реалиям и переходить к низкоуглеродной модели управления [10-12].

Обогатительные фабрики входят в число самых больших горнопромышленных объектов с точки зрения энергопотребления. На измельчение руды расходуется до 4% электроэнергии в мире согласно [13]. Подготовительная стадия руды к обогащению является самой энергоемкой. Затраты, приходящиеся на измельчение руды могут достигать до 70 % от всех затрат горно-обогатительных комбинатов. В среднем на предприятиях, где процесс измельчения автоматизирован в соответствии с минимальным уровнем интеллектуализации, эти затраты составляют 50 % от всех затрат [13-16]. В [15] отмечается, только 1-2 % потребляемой электрической энергии идет на создание новых поверхностей посредством энергии удара. Специальная организация, созданная для повышения эффективности процесса из-

мельчения – Coalition for Eco Efficient Comminution приводит следующие данные по распределению энергетических затрат на горно-обогатительных комбинатах [17]: 4% – транспорт руды; 7% – флотация; 22% – выщелачивание; 1% – утилизация хвостов; 2% – бурение и взрывные работы; 53% – измельчение.

Таким образом, мельницы (преимущественно барабанные), являются главными потребителями электроэнергии на фабриках и самыми энергоемкими относительно операционных затрат, требуемых для изготовления продукции [16].

Становится очевидным, что улучшение процесса измельчения с точки зрения энергетических затрат является новой возможностью для получения экономических и экологических выгод.

Проблема процесса измельчения, главным образом, обусловлена неэффективным энергопотребле-

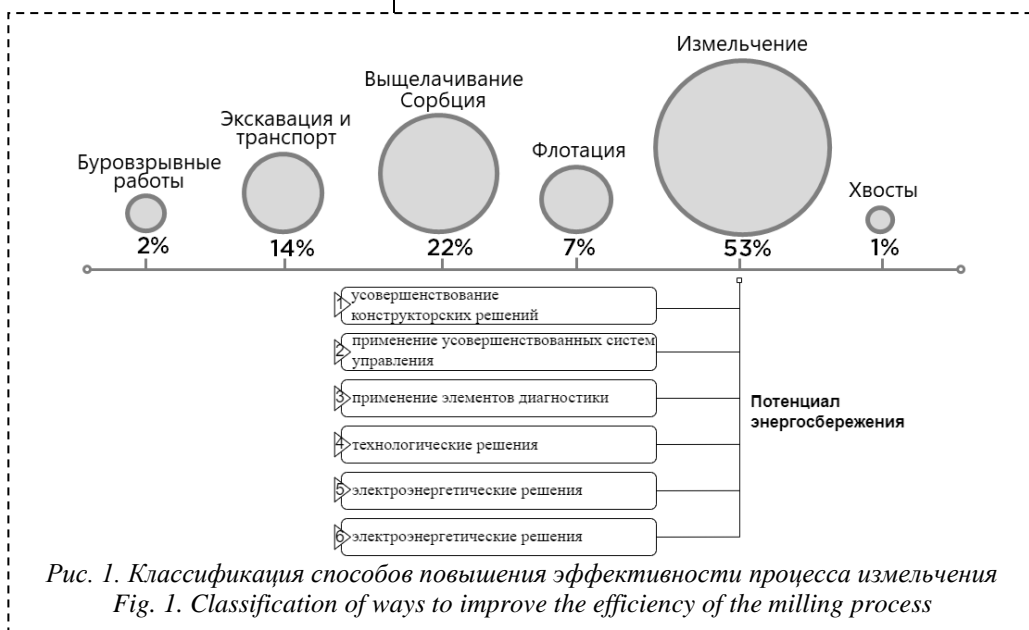


Рис. 1. Классификация способов повышения эффективности процесса измельчения  
Fig. 1. Classification of ways to improve the efficiency of the milling process

нием. Несмотря на большой опыт использования барабанных измельчительных агрегатов и их широкое общемировое применение на горно-обогатительных комбинатах, энергозатраты, требуемые на получение готового продукта до сих пор не оптимизированы, и значительная часть энергии используется неэффективно. В загрузке мельницы образуется внутреннее ядро - неподвижная зона, на измельчение которого требуется больше времени и, соответственно, энергии [14]. Кроме того, процесс измельчения характеризуется не только энергоемким, но и малоэффективным, так как большая часть энергии разрушения переходит в тепловую энергию в результате трения между измельчающей и измельчительной средой.

Преимущественно все исследования ученых направлены на то, чтобы достичь минимально возможных энергетических затрат за счет энергии удара, в результате достижения руды верхней точки внутри барабана мельницы.

**Классификация способов повышения эффективности процесса измельчения**

Потребление электроэнергии в результате разрушения руды при измельчении зависит от матри-

цы параметров и факторов. Существуют различные научно-технические комплексы мер, которые направлены на рациональное использование ресурсов.

Изучив пути развития технологий процесса измельчения, можно выделить следующие основные сформировавшиеся тренды, относительно которых придерживаются промышленные предприятия [18]:

- усовершенствование классических цепей измельчения посредством использования энергосберегающих мельниц;
- интеллектуализация управления процессом измельчения за счет использования технологий искусственного интеллекта и машинного обучения;
- снижение энергетических стрессоров, оказывающих негативное влияние на экологическую обстановку;
- тенденция к использованию крупномасштабных измельчительных агрегатов, характеризующихся большой производительностью и высокой мощностью.

За последние двадцать лет зарубежные страны-лидеры по переработке полезных ископаемых (Австралия, Чили, Канада, Перу) провели множество научных исследований в области повышения энергоэффективности процесса измельчения [19]. Основываясь на лучших мировых практиках, в исследовании разработана классификация основных решений по повышению эффективности процесса измельчения (рис. 1).

### **1. Усовершенствование конструкторских решений**

В данном направлении повышения эффективности широкое распространение получили следующие практики: усовершенствование внешних конструкторских решений (разработка энергосберегающих мельниц) [18] и внутримельничных конструкторских решений (лифтеры), обеспечивающие высокие траектории падения измельчаемой руды [20].

Мельницы с перемешиванием мелющей среды являются эффективными на 50 % относительно шаровых мельниц [21]. Существует 12 типов данных мельниц. Самыми распространенными мельницами являются Vertmill Metso [21] и Horizontal Isamill Technology [22].

### **2. Применение усовершенствованных систем управления (Advanced Process Control - APC)**

Во многом снижение энергетических затрат будет зависеть от спроектированной системы управления. Синтез системы управления процесса измельчения осуществляется, исходя из математического описания данного процесса.

*Математическое описание объекта управления.* С точки зрения физико-химических процессов измельчение представляет собой перемещение потоков внутри барабана мельницы. Для математического описания процесса измельчения в мельничном агрегате используются следующие математические модели: модель идеального вытеснения, модель идеального смешения, ячеечная и диффузионная модели [23, 24]. Идентификация параметров

данных моделей заключается в определении переменных, смысл которых заключается в распределении времени пребывания частиц горной породы в рассматриваемом барабане мельницы. Этот характер распределения подчиняется статистическим законам и находится по виду сигнала, проходящего через систему. Таким образом, для идентификации параметров математической модели необходимо получить кривую отклика модели на входной сигнал, где данным сигналом является исходный продукт, а выходным – готовый.

Большинство способов решения задач автоматизации связано со стабилизацией следующих контуров в составе системы управления:

- контур регулирования подачи исходного сырья;
- контур регулирования соотношения твердое : жидкое в барабане мельницы;
- регулирование плотностью слива классификатора.

Однако использование только контуров стабилизации в составе системы управления процессом измельчения не является эффективным способом в достижении высокой производительности, что обусловлено большим запаздыванием в системе, нелинейным и вероятностным характером процессов разрушения руды с вариативной динамикой внутри мельницы, вызванной изменчивостью грансостава и физико-механических свойств поступающей руды.

Таким образом, поддержание фиксированных технологических параметров является нецелесообразным. В усовершенствованных системах управления таких, как MillStar [25], кроме контуров стабилизации используется контур оптимизации процесса измельчения, основанного на оценке потребляемой мощности электроприводом мельницы при определенной степени заполнения барабана мельницы. Система собирает технологические данные с полевого уровня и на основании данных о потребляемой мощности изменяет задания на вход питателя для подачи руды в мельницу и на вход задвижки, регулирующую подачу воды в мельницу, для достижения оптимальной загрузки, при которой будет достигаться наибольшая производительность процесса за то же время измельчения.

Для горно-обогатительных предприятий модернизация систем управления является эффективным инструментом для повышения эффективности процесса измельчения - ее рациональная организация позволяет сокращать потребление энергии до 21 % [15].

### **3. Диагностика процесса измельчения и оценка остаточного ресурса**

Процесс измельчения сопоставим с черным ящиком, за протеканием процессов в котором невозможно наблюдать без интеллектуальных методов диагностики. Кроме технологических параметров необходимо контролировать и остаточный ресурс футеровки и лифтов мельницы, так как преждевременный износ сказывается на производительности измельчительного агрегата [26-28].

Наиболее значимыми технологическими переменными, по которым можно оценить эффективность работы мельницы в процессе измельчения, являются грансостав готового продукта и степень заполнения мельницы. Однако появляются подходы, основанные на интеллектуальном анализе данных и интеграции измеряемых параметров разной физической природы, в том числе данных электрических измерений [29-31].

#### 4. Технологические решения повышения энергоэффективности

Подходы к автоматизации процесса измельчения могут быть разными, однако основными управляемыми технологическими переменными, которые оказывают наибольшее влияние на технологические и на энергетические параметры процесса измельчения, являются:

- частота вращения барабана мельницы;
- расход подаваемого сырья в мельницу;
- расход воды, подаваемой в мельницу.

Основными контролируемыми переменными являются:

- коэффициент заполнения барабана мельницы;
- грансостав готового продукта.

*Режимы работы барабанных мельниц.* Скорость вращения барабана мельницы влияет на интенсивность разрушения руды, а также на потребляемую мощность электропривода, который обеспечивает вращение барабана. Таким образом, за счет управления частотой вращения барабана можно регулировать энергию, которая необходима для разрушения руды и выбирать интенсивность разрушения. В промышленных условиях мельницы работают при частоте вращения барабана 50 - 85 % от критической частоты вращения. Таким образом, существуют следующие режимы работы:

- каскадный режим (характеризуется частотой вращения барабана 50 – 60 % от критической скорости);
- водопадный режим (характеризуется частотой вращения барабана 70-85 % от критической скорости);
- смешанный режим (промежуточным между каскадным и водопадным режимами измельчения с частотой вращения барабана мельницы 60-70 % от критической скорости).

Исследования по влиянию частоты вращения барабана мельницы на эффективность процесса измельчения проводились неоднократно. К примеру, в [14] авторы считают, что вовлечение ядра внутримельничной загрузки, которое остается не задействованным в процессе измельчения, возможно при выборе оптимальной скорости, которая позволит обеспечить синхронный режим колебаний ядра с окружающей его загрузкой. Под ядром внутримельничной загрузки подразумевается та часть руды, которая не измельчается за счет проскальзывания образованных слоев загрузки. Включить ядро руды в процесс измельчения возможно за счет корректировки скоростного режима работы мельницы на основании детального изучения динамики внутримельничной загрузки.

Так как измельчение руды является закрытым процессом без возможности наблюдения за ним, подробные исследования внутримельничной динамики возможно осуществить только с помощью специализированных программных средств, предназначенных для моделирования сыпучих сред [19].

Максимизация энергии на разрушение измельчаемой руды за счет увеличения скорости мельницы может повлиять и на ускоренный износ футеровки и лифтов мельниц, и на динамику истирания измельчающих тел при использовании шаровых и стержневых мельниц [32]. Таким образом, в долгосрочной перспективе это не приведет к повышению экономической и энергетической эффективности процесса измельчения.

Повышение эффективности процесса измельчения основывается на изучении процессов взаимодействия измельчаемой и измельчающей сред внутри барабана мельницы и оценки энергетических затрат, необходимых для дезинтеграции руды, при различных режимах работы мельницы. На сегодняшний день наиболее распространенным методом изучения процессов, протекающих внутри барабана мельницы, является метод дискретных элементов (Discrete Element Method (DEM) [33-35]. Данный метод позволяет проводить фундаментальное численное моделирование, связанное с расчетом всех контактных взаимодействий, происходящих между условно неделимыми объектами.

Метод DEM пришел на смену классическим теориям по расчету энергетических затрат. В классической теории расчет энергопотребления осуществляется по основным эмпирическим формулам: Олевского, Chen Bingchen, Davis, Levinson, Bond [34]. Однако почти все классические методы не учитывают влияние лифтеров и позволяют отразить только влияние скорости вращения, степени заполнения загрузки, размер и форму мелющих тел, что является некорректным. Метод DEM позволяет оценить потребляемую мощность на основании взаимодействия материалов, участвующих в процессе измельчения.

Ученые К. Rajamani и В.К. Mishra из США (Юта) в 1992 г. были первыми, кто применили метод DEM для изучения процесса измельчения. В их работе [35] получена математическая модель процесса измельчения, при использовании которой возможно было производить предиктивный анализ потребляемой мощности при изменении скорости барабана мельницы и коэффициента заполнения, а также взаимодействия материалов внутримельничной загрузки.

Отдельно выделены научные труды, преимущественно на основании которых сделаны выводы и сформулированы предложения по повышению энергоэффективности процесса измельчения за счет изменения динамики внутримельничной загрузки. В [19] с помощью DEM проводились однофакторные исследования и оценивалось влияние операционных и конструкторских параметров на процесс измельчения руды. Столкновения, происходящие между элементами измельчаемой и измельчитель-

ной средами, представлялись в виде энергетических спектров.

В энергетических спектрах наибольшие значения энергий столкновений связаны с падением самых крупных частиц с пиковой точки барабана по траекториям водопадного режима работы. Однако частота падений для каждой частицы руды мала, поэтому общий вклад в распределение энергетических спектров при возникновении столкновений не значителен. При увеличении скорости мельницы энергия смещается в область больших значений, что приводит к более интенсивному разрушению породы за счет увеличения высоты падения крупных частиц.

В результате экспериментов было получено, что увеличение скорости мельницы оказывает незначительное влияние на распределение энергии между различными типами столкновений загрузки. Однофакторное уменьшение высоты лифтеров, увеличение степени заполнения загрузки, уменьшение отношения породы к шарам в шихте приводили к меньшему разрушению ударом. Однако это не соответствовало тому, что энергия, потребляемая электроприводом, была меньше. К примеру, в случае с повышением коэффициента заполнения, происходит перераспределение энергии между ударом и истиранием. Также, необходимо учитывать виды столкновений внутри барабана мельницы. Потребляемая мощность может быть увеличена не за счет повышения вероятности столкновений между породой-породой, а между телами измельчения, что не будет свидетельствовать о повышении эффективности процесса измельчения.

Несмотря на то, что в статье рассмотрены вопросы перераспределения энергии между разными типами ударов в зависимости от однофакторного изменения какого-либо из параметров, не учитывается совокупное их изменение и соответствующее влияние на процесс измельчения.

В [34] авторами отмечено, что процесс измель-

чения является комплексным и невозможно получить соответствующие положительные эффекты в повышении энергоэффективности за счет оценки влияния одного параметра при постоянном значении других. Так, установлено, что мощность, потребляемая мельницей, имеет прямо пропорциональную зависимость от высоты лифтов и их количества при низкой скорости и обратно пропорциональную зависимость при высокой скорости.

Проанализировав работы ученых [19, 36, 37] сделан вывод, что в последнее время все больший интерес возникает при исследовании взаимосвязей между технологическими переменными, в которых проводится трехфакторный анализ.

Проведение данных исследований связано, в первую очередь, с обоснованием эффективности процесса измельчения при корректировке одного из параметров, так как изменение одного параметра окажет изменение на процесс измельчения в целом.

Цифровое моделирование играет важную роль при проведении испытаний измельчения руды. Эмпирические методы не позволяют зафиксировать значения конкретных параметров для формирования выводов об их влиянии на эффективность процесса измельчения.

### 5. Электроэнергетические методы

Применительно к горнопромышленному сектору рост спроса на минеральное сырье в сочетании с падением содержания полезного компонента приведет к увеличению спроса на первичную и вторичную энергию, которая необходима на всех стадиях по производству готового продукта (рис. 2).

Как правило, горно-обогатительные фабрики строятся в непосредственной близости к месторождениям, что накладывает определенные ландшафтные трудности и ограничения на развитие энергетической инфраструктуры. Нарращивание мощностей по мере развития таких предприятий может быть затруднено по экономическим и техническим причинам. Закладывание дополнительных

мощностей на этапе проектирования горнопромышленных объектов приводит к неэффективному использованию электротехнического оборудования и энергетической инфраструктуры [38].

К примеру, в ресурсной цепочке на рис. 2 увеличение одного из компонентов – процесса измельчения, потребует наращивания мощностей за счет строительства новой генерации, так как энергосберегающие

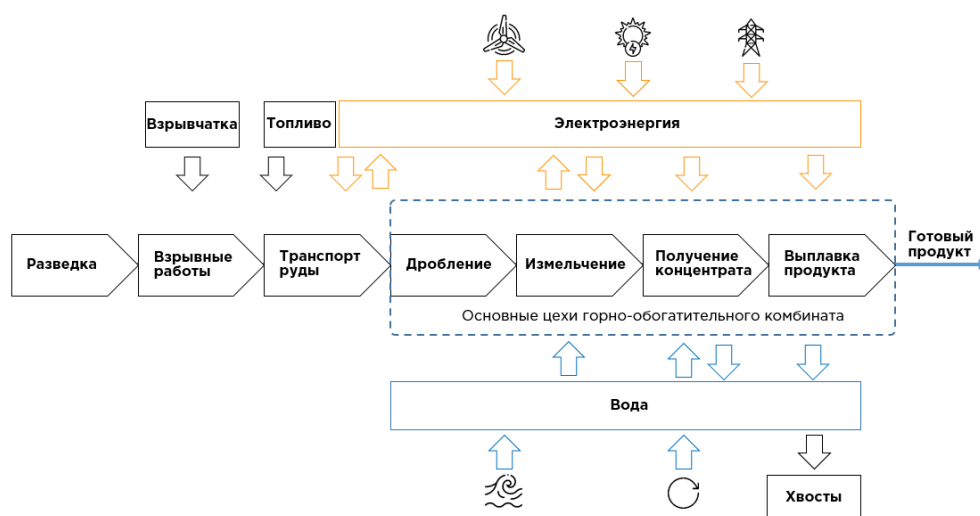


Рис. 2. Упрощенная схема цепочки ресурсных потребностей горно-обогатительной фабрики

Fig. 2. Simplified scheme of the resource requirements chain of a mining and processing plant

решения, рассмотренные выше, не всегда позволяют высвободить дополнительную мощность. В соответствии с политикой декарбонизации для горнодобывающей промышленности потребуется интеграция возобновляемых с невозобновляемыми источниками энергии, а также – распределенной с централизованной энергетикой [39, 40]. Актуально и использование электромеханических комплексов второго и третьего уровней энергетической совместимости, позволяющих обеспечить внешнюю и внутреннюю рекуперацию электроэнергии. Возможно создание отдельных микрогрид систем на территории горнопромышленных предприятий, если рассматривать минерально-сырьевые комплексы за рубежом или же создание активных энергетических комплексов – в России [41].

В [42] рассматриваются подходы к внедрению солнечных панелей на обогатительных фабриках в Чили, а также примеры реализации проектов на соответствующих фабриках. Примером успешного наращивания мощностей за счет использования возобновляемых источников энергии является строительство микрогрид системы, питающего рудник компании Agnew Gold Fields в Австралии [43].

## 6. Электромеханические решения

Как уже было описано процесс измельчения потребляет больше всего энергии. Управление данным процессом возможно осуществить с помощью электропривода. Таким образом, правильно спроектированный и эксплуатируемый электропривод с элементами интеллектуализации позволит обеспечить снижение потребляемой энергии [44].

Для управления скоростью мельницы могут использоваться электроприводы различных механических структур. Главным определяющим фактором выбора структуры электропривода является мощность мельницы. Таким образом, существуют три схемы электропривода в зависимости от мощности мельницы в соответствии с рекомендациями компании АВВ [45, 46]:

- схема однодвигательного электропривода с диапазоном применения МВт - 9 МВт;
- схема двухдвигательного электропривода с диапазоном применения МВт - 18 МВт;
- схема безредукторного электропривода с диапазоном 12 МВт - 36 МВт.

### Двухдвигательный электропривод мельницы

Переход от схемы однодвигательного электропривода к схеме двухдвигательного электропривода мельницы обусловлен максимальным моментом, который возможно передать объекту управления через одну приводную шестерню. Когда мощности мельниц достигли 9 МВт использование одной приводной шестерни для передачи вращающегося момента стало невозможным, что связано с пределом прочности материала, из которого изготавливаются зубчатые передачи.

В настоящее время наблюдается тенденция в увеличении размеров мельниц, а, следовательно, и в увеличении их мощностей, которая обусловлена в более экономичной переработке больших объемов руд.

Использование крупногабаритных мельниц и соответствующее сокращение линий измельчения позволяет добиться наименьших капитальных и эксплуатационных затрат. Таким образом, мельницы с двухдвигательным электроприводом получили широкое распространение и являются главными потребителями на горно-обогатительных комбинатах.

Система управления. Для управления двигателями могут использоваться три системы управления:

- система скалярного управления (ССУ);
- система векторного управления (СВУ);
- система прямого управления (СПУ).

Скалярное управление предполагает пропорциональное изменение амплитуды и частоты напряжения статора для поддержания номинального значения потокосцепления статора. Математической основой описания скалярного управления являются уравнения, описывающие установившиеся режимы работы двигателя, при условии, что скорость и момент нагрузки остаются неизменными. Таким образом, в динамических режимах работы математическая модель системы скалярного управления не позволяет обеспечить быстрое действие при возникновении изменений.

Система прямого управления позволяет обеспечить управление переменными электропривода напрямую [47]. Однако математическое описание, положенное в реализацию данной системы управления, предполагает наличие полос пульсаций момента и потокосцепления. В условиях работы при повышенных вибрациях механизма измельчения дополнительные колебания электромеханических величин могут привести к быстрому появлению неисправностей в узлах электропривода [48, 49].

При реализации векторной системы управления используются дифференциальные уравнения, которые позволяют описать машину корректно в статических и динамических режимах работы [50].

Система скалярного управления не позволяет учесть особенности объекта управления – барабанной мельницы [51]. Возникновение возможных неисправностей в двухдвигательном электроприводе возможно предотвратить при использовании векторной системы управления с корректирующими алгоритмами, предложенными в данной статье.

Особенности двухдвигательного электропривода с жесткой связью. Использование двухдвигательного электропривода позволяет снизить мощность приводного двигателя в составе привода, а также обеспечить повышение надежности за счет структурного резервирования, но предполагает согласованное точное регулирование из-за возможного неравномерного распределения нагрузки между двигателями. Неравномерность распределения связана с отличием обмоточных параметров приводных машин, что приводит к изменению жесткости механических характеристик.

Активное сопротивление обмоток статора и ротора, индуктивность цепи намагничивания – это параметры, которые способны изменяться от внешних причин, а также при наличии износа и повре-

ждений электрических машин и электрических преобразователей [52]. Изменение обмоточных параметров двигателей приводит к изменению индуктивности намагничивания. Индуктивность цепи намагничивания связана с эффектом насыщения магнитной системы главным магнитным потоком,

$$\Psi_{31} = k_1 \cdot \Psi_{ном1}; \quad (5)$$

$$\Psi_{32} = k_2 \cdot \Psi_{ном2}. \quad (6)$$

где  $\Psi_{ном1}$  и  $\Psi_{ном2}$  – номинальные потокосцепления первого и второго двигателя;  $k_1$  и  $k_2$  – корректирующие коэффициенты.

Таблица 1. Основные параметры асинхронного двигателя Simotics HV M.

Table 1. Main parameters of the asynchronous motor Simotics HV M.

$P_{ном}$ , кВт	$n_{ном}$ , об/мин	$n_0$ , об/мин	$U_{ном}$ , В	$\eta_{ном}$	$\cos\varphi_{ном}$	$\lambda$	$K_i$	$J_{об}$ , кг·м <sup>2</sup>
5150	595	600	6000	0,972	0,85	2,45	4,5	618

изменение которой способно повлиять на качество регулирования и на работоспособность электро-

Имитационное моделирование. Параметры структурной схемы рассчитаны согласно методи-

Таблица 2. Основные параметры асинхронного двигателя Simotics HV M.

Table 2. Nominal parameters of the simulation model.

$L_\mu$ , Гн	$k_r$	$R_d$ , Ом	$T_d$ , с	$K_z$ , рад/с	$T_z$ , с	$z$	$F_{рот}$ , Вб	$K_\mu$	$T_\mu$ , с	$T_r$ , с
0,248	0,952	0,162	0,13	62,8	0,1	5	15	8485	0,001	5,035

привода. В данной статье выполнено имитационное моделирование, с использованием линеаризованной системы векторного регулирования при разных значениях индуктивности намагничивания. Полученные результаты доказывают, что изменение индуктивности намагничивания может оказать существенное влияние на формирование механических характеристики приводных машин.

*Корректирующие алгоритмы в составе СВУ.* Выравнивание нагрузок возможно достичь путем дополнительного алгоритма корректировки моментов (КАМ), который может быть интегрирован в СВУ. Необходимо отметить, что с помощью разработанных алгоритмов возможно не только обеспечить равномерное распределение нагрузки, но и обеспечить оптимальное энергопотребление и равномерное старение оборудования за счет выравнивания потребляемых токов с помощью алгоритма корректировки потоков (КАП).

*Алгоритм коррекции момента*

- Расчет общего момента двигателей  $M_{об}$

кам, описанных в [53]. Механизм вращения мельницы является главным механизмом процесса измельчения. В качестве исполнительного механизма рассмотрен механизм вращения шаровой мельницы с размерами барабана  $6,4 \times 10,2$  м и мощностью 8203 кВт производителя Metso [54]. Вычисление параметров модели проделано для асинхронного двигателя Simotics HV M фирмы Siemens. Основные параметры двигателя, необходимые для моделирования, представлены в таблице 1, где  $P_{ном}$  – номинальная мощность;  $n_{ном}$  – номинальная частота вращения;  $n_0$  – синхронная частота вращения;  $U_{ном}$  – действующее номинальное значение напряжения;  $\eta_{ном}$  – номинальный КПД;  $\cos\varphi_{ном}$  – номинальное значение коэффициента мощности;  $\lambda$  – перегрузочная способность;  $K_i$  – кратность пускового тока к номинальному;  $J_{об}$  – момент инерции. Рассчитанные номинальные параметры имитационной модели представлены в таблице 2, где  $L_\mu$  – индуктивность намагничивания;  $k_r$  – отношение индуктивности намагничивания к индуктивности ротора;  $R_d$  – эк-

Таблица 3. Параметры имитационной модели при 0,8L<sub>μ</sub>.

Table 3. Simulation model parameters at 0.8L<sub>μ</sub>.

$L_\mu$ , Гн	$k_r$	$R_d$ , Ом	$T_d$ , с	$K_z$ , рад/с	$T_z$ , с	$z$	$F_{рот}$ , Вб	$K_\mu$	$T_\mu$ , с	$T_r$ , с
0,199	0,762	0,145	0,73	62,8	0,1	5	15	618	8485	0,001

$$M_{об} = M_{эд1} + M_{эд2}, \quad (1)$$

где  $M_{эд1}$  – момент первого электродвигателя;  $M_{эд2}$  – момент второго электродвигателя.

$$M_{об/2} = \frac{M_{об}}{2}. \quad (2)$$

- Расчет добавочных моментов  $M_{д1}$  и  $M_{д2}$  для коррекции задания на момент

$$M_{д1} = M_{об/2} - M_{эд1}; \quad (3)$$

$$M_{д2} = M_{об/2} - M_{эд2}. \quad (4)$$

*Алгоритм коррекции потока*

- Вычисление задания на поток

вивалентное активное сопротивление асинхронного двигателя;  $T_d$  – эквивалентная постоянная времени асинхронного двигателя;  $K_z$  – номинальная скорость двигателя;  $T_z$  – постоянная времени, регулирующая кривую разгона;  $z$  – число пар полюсов;  $F_{рот}$  – номинальное потокосцепление ротора;  $K_\mu$  – коэффициент усиления инвертора;  $T_\mu$  – постоянная времени инвертора;  $T_r$  – постоянная времени обмотки ротора.

Эффект насыщения цепи намагничивания оказывает существенное влияние на динамические процессы электропривода. В рабочих режимах ин-



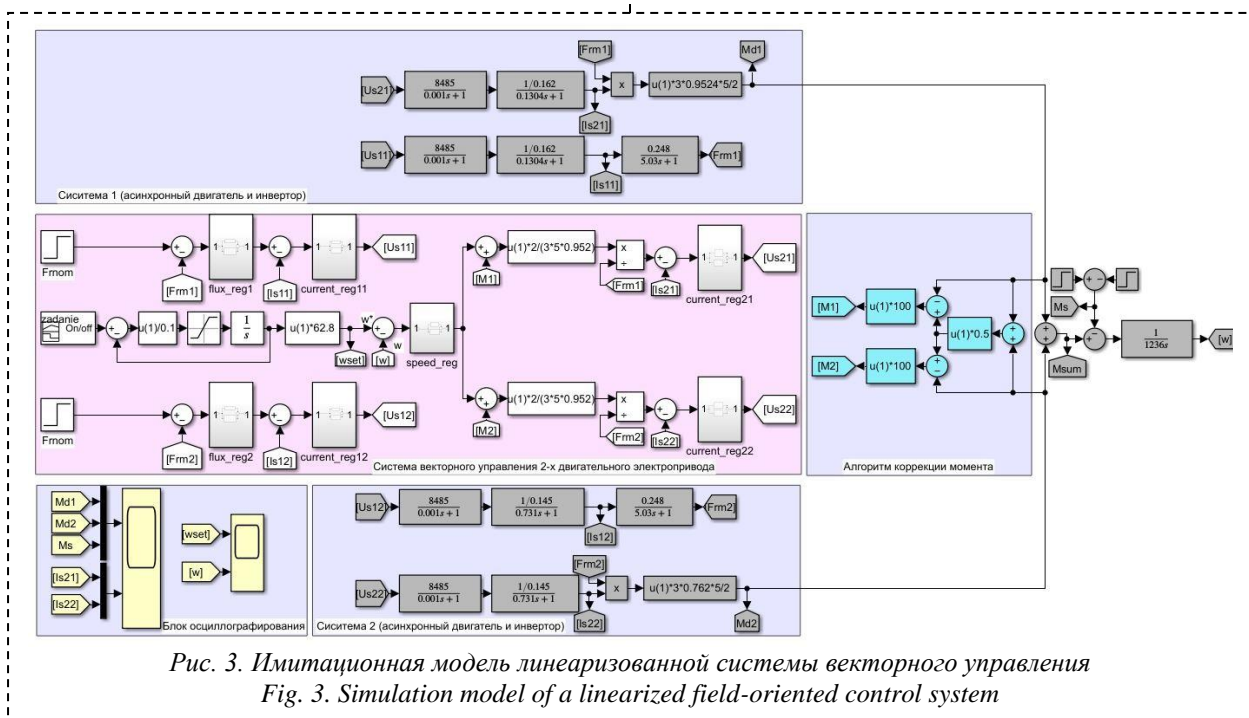


Рис. 3. Имитационная модель линейризованной системы векторного управления  
 Fig. 3. Simulation model of a linearized field-oriented control system

дуктивность намагничивания может изменяться до 30%. При управлении высоко динамичными системами с целью достижения быстродействия в технологических процессах в большом диапазоне требуется регулирование потокоцеплением.

Таким образом, было проведено три эксперимента. Все эксперименты проводились с пониженной индуктивностью цепи намагничивания второго двигателя на 20% [52, 55]. Пересчитанные параметры имитационной модели представлены в таблице 3. Синтез регуляторов осуществлен, исходя из номинальных параметров двигателей. Параметры регуляторов представлены в таблице 4, где  $K_{ri}$  и  $T_{ri}$  – коэффициент усиления и постоянная интегрирования регуляторов потоко- и моментобразующих токов;  $K_{rf}$  и  $T_{rf}$  – коэффициент усиления и постоянная интегрирования регуляторов потокоцепления;  $K_{rs}$  и  $T_{rs}$  – коэффициент усиления и постоянная интегрирования частоты вращения.

На рис. 3 представлена имитационная модель, в соответствии с которой были проведены эксперименты. Имитационная модель состоит из пяти основных блоков:

- система 1: асинхронный двигатель и инвертор в составе двухдвигательного электропривода;
- система 2: асинхронный двига-

тель и инвертор в составе двухдвигательного электропривода;

- система векторного управления двухдвигательным электроприводом;
- алгоритм коррекции момента;
- блок осцил лографирования.

В данной имитационной модели инверторы и асинхронные двигатели представляют собой апериодические звенья первого порядка. Система векторного управления состоит из двух каналов: электромагнитного и электромеханического каналов регулирования. Управление осуществляется пото-



Рис. 4. Результаты первого эксперимента  
 Fig. 4. Results of the first experiment

Таблица 4. Настроечные параметры ПИ-регуляторов.

Table 4. PI controller settings.

Регуляторы потоко- и моментобразующих токов		Регуляторы потокоцепления		Регуляторы частоты вращения	
$K_{ri}$	$T_{ri}, c$	$K_{rf}$	$T_{rf}, c$	$K_{rs}$	$T_{rs}, c$
0,00125	104,6	5072	0,0009	135000	0,004



ко- и моментобразующим токами.

*Эксперимент 1. Моделирование без корректирующих алгоритмов.* Результаты имитационного моделирования без корректирующих алгоритмов



Рис. 5. Результаты второго эксперимента  
Fig. 5. Results of the second experiment

показали, что при изменении обмоточных параметров, нагрузка распределяется неравномерно между двигателями. Номинальные значения моментов двигателей составляют 82654 Н·м. Однако момент одного из двигателей равен 89000 Н·м, что не соответствует рекомендуемым эксплуатационным характеристикам, двигатель будет работать неэффективно. Главным образом, ухудшатся его энергетические характеристики. КПД и коэффициент мощности асинхронных двигателей имеют нелинейные зависимости от коэффициента загрузки, отличие приложенного момента на валу от номинального приведет к снижению данных характеристик. К тому же, ресурсы обоих двигателей и механических соединений будут расходоваться неравномерно. Амплитудные значения токов составляют 830 А, так как система управления настроена на номинальные параметры двигателей. Результаты имитационного моделирования без выравнивания нагрузок представлены на рис.4.

Таким образом, полученная осциллограмма соответствует следующим режимам работы электропривода:

- момент времени  $t=1-2$  о.е. соответствует разгону двигателя;
- момент времени  $t=3-4,5$  о.е. соответствует работе двигателя под нагрузкой;
- момент времени  $t=5,6$  о.е. соответствует торможению двигателя.

*Эксперимент 2. Моделирование с корректировкой задания на момент.* В результате имитационного моделирования с алгоритмом корректировки (рис. 5) значения электрических моментов двигате-

лей равны и составляют 80000 Н·м. Корректировка осуществляется за счет добавочных значений моментов. В связи с этим, задания на моментобразующий ток будут неодинаковы, поэтому значения амплитуд токов не равны и составляют: для первого двигателя 750 А, а для второго – 930 А. Значение тока выше номинального (см. эксперимент 1) для второго двигателя приведёт к повышенному электропотреблению и к более быстрому износу оборудования, ресурсы двигателей будут использоваться неравномерно.

*Эксперимент 3. Моделирование с корректировкой задания на момент и на потокосцепление.* Таким образом, по аналогии со вторым экспериментом выравнивание амплитудных токов происходит за счет корректировки задания на потокосцепление (рис. 6). Задавшись номинальным потокосцеплением второго двигателя 19 Вб, происходит выравнивание с помощью добавочных значений потокосцепления и, соответственно,

изменение значений потокообразующих токов. Амплитудные значения токов становятся одинаковыми. Значения электрических моментов двигателей равны и составляют 80000 Н·м. Значения амплитудных равны и составляют 750 А.

Так как двухдвигательный электропривод с жесткой связью скорость вращения приводных двигателей будет одинаковой. Наличие или отсут-

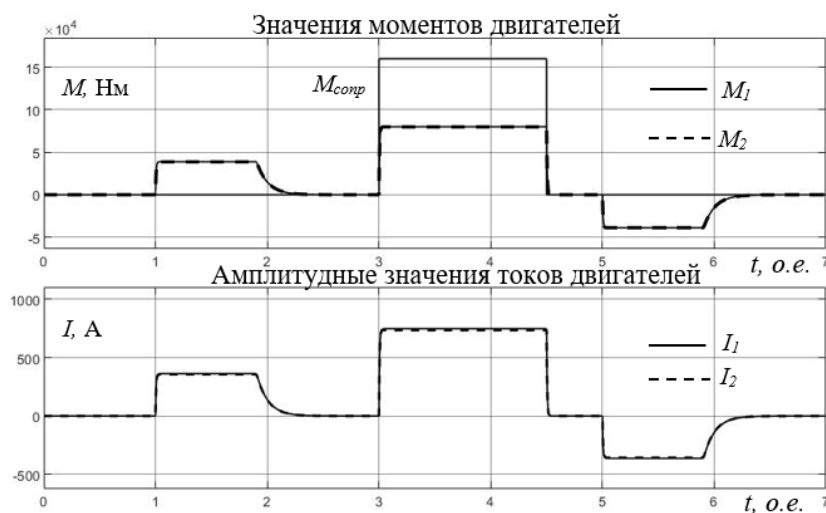


Рис. 6. Результаты третьего эксперимента  
Fig. 6. Results of the third experiment

ствие корректирующих алгоритмов в составе векторной системы управления не влияет на качество регулирования частоты вращения. Управляемый сигнал соответствует заданию – 62,8 рад/с. Момент времени  $t=3$  о.е. соответствует набросу нагрузки, а момент времени  $t=4,5$  о.е. – сбросу нагрузки. Статическая ошибка в период времени, когда двигатель работает под нагрузкой, обусловлена скольже-

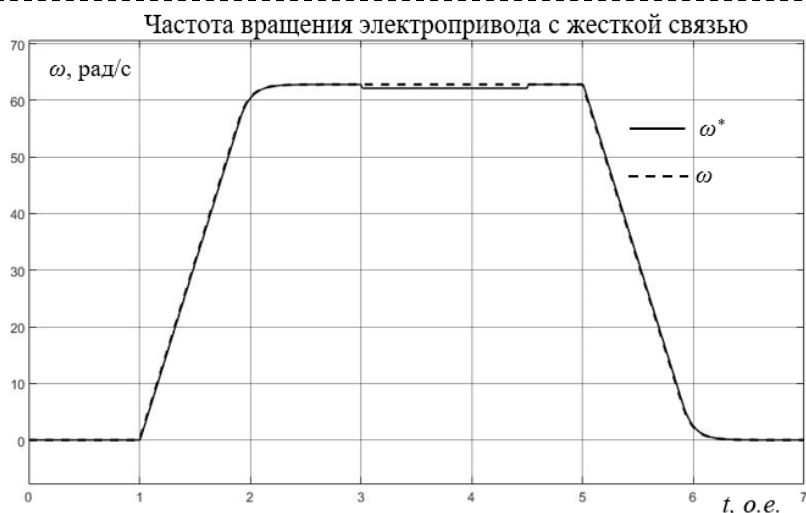


Рис. 7. Частота вращения двухдвигательного электропривода

Fig. 7. Speed of the twin-motor electric drive

нием двигателя; динамическая ошибка находится в пределах  $\pm 5\%$  (рис. 7).

Исследование показало, что отличие обмоточных параметров двигателей от номинальных, обусловленное изменением внешних условий, возможно учесть с помощью корректирующих алгоритмов момента и потокосцепления. Наибольшее влияние на работу двигателей высокой мощности оказывает изменение индуктивности цепи намагничивания.

Задание на скорость и регулятор частоты вращения для обоих двигателей являются одинаковыми. Задания на момент корректируются с помощью добавочных моментов, которые вычисляются по разработанному алгоритму выравнивания моментов.

При изменении параметров электродвигателей также требуется коррекция заданий на потокосцепление роторов за счет добавочных потоков, вычисляемых по алгоритму выравнивания потоков.

**Вывод.** Наибольшим потенциалом энергосбережения на горно-обогатительном предприятии обладают мельницы, так как они являются самыми большими потребителями электроэнергии.

В статье представлена разработанная классификация способов повышения эффективности процесса измельчения, основанная на конструкторских решениях, применении усовершенствованных систем управления, технологических и электроэнергетических решениях и на усовершенствовании электромеханических систем.

Представленная классификация показывает, что эффективность процесса измельчения может быть снижена, в том числе, в результате проведения неточных расчетов технологических режимов работы мельниц. В результате осуществляется неправильный выбор электромеханического оборудования и последующая его настройка с точки зрения энергоэффективности.

Таким образом, в статье особое внимание уделяется внедрению усовершенствованных систем управления на базе цифрового моделирования, как

одного из инструментов повышения эффективности процесса измельчения.

В рамках классификации авторами подробнее рассмотрены электромеханические способы повышения энергоэффективности процесса измельчения.

Двигатели мельниц работают в продолжительном режиме работе, что приводит к изменению обмоточных параметров машин под действием нагрева и, как следствие, к изменению индуктивности намагничивания и к формированию разных электромагнитных моментов в двухдвигательном электроприводе. Разработанные корректирующие алгоритмы в составе векторной системы управления электроприводом, позволяют учесть возможные

изменения обмоточных параметров электродвигателей под воздействием внешних факторов. Определено влияние данных алгоритмов на уровень энергоэффективности электропривода.

Выполнено три эксперимента при пониженном значении индуктивности цепи намагничивания второго двигателя на 20%:

- при проведении первого эксперимента рассогласование между формируемыми электромагнитными двигателями составило 6346 Нм. Формируемые электромагнитные моменты отличались от номинального момента;

- при проведении второго эксперимента в состав СВУ был включен КАМ. В результате, рассогласование между моментами составило 0 Нм. Однако за счет дополнительного намагничивания второго двигателя появилась разница между токами статора двигателей и составила 180 А. Токи статора, соответственно, также отличались от номинального значения;

- при моделировании СВУ с алгоритмами КАМ и КАП достигается выравнивание моментов между приводными машинами и минимальное электропотребление – 750 А.

Совместное использование корректирующих алгоритмов момента и потокосцепления позволяет обеспечить не только выравнивание моментов электродвигателей в составе двухдвигательного электропривода с жесткой связью, но и оптимальное энергопотребление и равномерное использование ресурсов оборудования за счет выравнивания амплитудных значений потребляемых токов приводных машин.

В соответствии с разработанной классификацией проводятся исследования по повышению эффективности процесса измельчения. Применение усовершенствованных алгоритмов управления электроприводом является одним из примеров повышения энергоэффективности. Дальнейший вклад в рациональное использование энергоресурсов требует внедрения комплексных мер согласно классификации способов повышения эффективности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Take Action for the Sustainable Development Goals - United Nations Sustainable Development [Электронный ресурс]. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (дата обращения: 01.03.2022).
2. Litvinenko, V.S.; Tsvetkov, P.S.; Dvoynikov, M.V.; Buslaev, G.V. Barriers of implementation of hydrogen initiatives in the context of sustainable development of global energy //Journal of the Mining Institute. – 2020. – Т. 244. – С. 428-438. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.5
3. Filatova, I.; Nikolaichuk, L.; Zakaev, D.; Ilin, I. Public-private partnership as a tool of sustainable development in the oil-refining sector: Russian case //Sustainability (Switzerland). – 2021. – Т. 13. №. 9. – С. 5153. DOI: 10.3390/su13095153.
4. Zhukovskiy Y. L. et al. Fossil Energy in the Framework of Sustainable Development: Analysis of Prospects and Development of Forecast Scenarios //Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 17. – С. 5268. DOI: 10.3390/en14175268.
5. Fedoseyev, S.V.; Tsvetkov, P.S. Key factors in public perception of carbon dioxide capture and disposal projects //Proceedings of the Mining Institute. – 2019. – Т. 237. – С. 361-368. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.361.
6. Koteleva, N.; Buslaev, G.; Valnev, V.; Kunshin, A. Augmented Reality System and Maintenance of Oil Pumps //International Journal of Engineering. – 2020. – Т. 33. – №. 8. – С. 1620-1628. DOI: 10.5829/ije.2020.33.08b.20.
7. Shabalov M. Y. et al. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector //Energy Reports. – 2021. – Т. 7. – С. 2664-2680. DOI: 10.1016/j.egyр.2021.05.001.
8. Zhukovskiy Y. et al. Scenario Modeling of Sustainable Development of Energy Supply in the Arctic //Resources. – 2021. – Т. 10. – №. 12. – С. 124. DOI: 10.3390/resources10120124.
9. Cherepovitsyn, A.E.; Lipina, S.A.; Evseeva, O.O. Innovative approach to the development of mineral and raw material potential of the Arctic zone of Russia //Notes of the Mining Institute. – 2018. – Т. 232. – С. 438-444. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.
10. Устойчивое развитие [Электронный ресурс]. URL: <https://www.phosagro.ru/sustainability/> (дата обращения: 01.12.2021).
11. Полюс [Электронный ресурс]. URL: <https://sustainability.polyus.com/ru/> (дата обращения: 01.12.2021).
12. Устойчивое развитие | Полиметалл [Электронный ресурс]. URL: <https://www.polymetalinternational.com/ru/sustainability/> (дата обращения: 01.12.2021).
13. Bortnowski P. и др. Energy Efficiency Analysis of Copper Ore Ball Mill Drive Systems //Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 6. – С. 1786. DOI: 10.3390/en14061786.
14. Góralczyk M. и др. Increasing Energy Efficiency and Productivity of the Comminution Process in Tumbling Mills by Indirect Measurements of Internal Dynamics — An Overview //Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 24. – С. 6735. DOI: 10.3390/en13246735.
15. Bouchard J., Desbiens A., Poulin É. Reducing the energy footprint of grinding circuits: the process control paradigm //IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Т. 50. – №. 1. – С. 1163–1168. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.402.
16. Jeswiet J., Szekeres A. Energy Consumption in Mining Comminution //Procedia CIRP. – 2016. – Т. 48. – С. 140–145. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.250.
17. Home - CEEC (Coalition for Eco Efficient Comminution) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ceecthefuture.org/> (дата обращения: 14.12.2021).
18. Meng R. и др. A Survey and Analysis on Electricity Consumption of Raw Material Mill System in China Cement Industry between 2014 and 2019 //Sustainability, 2021. – Т. 13. – №. 3. – С. 1126. DOI: 10.3390/su13031126.
19. Cleary P. W., Owen P. Effect of operating condition changes on the collisional environment in a SAG mill //Minerals Engineering. – 2019. – Т. 132. – С. 297–315. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.06.027.
20. Yin Z. и др. Effect of Lifter Shapes on the Mill Power in a Ball Mill //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Т. 452. – №. 4. – С. 042201. DOI: 10.1088/1757-899X/452/4/042201.
21. Vertimill® - Metso Outotec [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mogroup.com/es/portafolio/vertimill/?r=1> (дата обращения: 14.12.2021).
22. IsaMill™ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.glencoretechnology.com/en/technologies/isamill> (дата обращения: 14.12.2021).
23. Кафаров В. В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. – 1991.
24. Александров А. В., Литвинова Н. М. Экспериментально-теоретические исследования процесса измельчения руд //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – Т. 4. – №. 12. – С. 242-249.
25. Measurement and Control | Mintek [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mintek.co.za/technical-divisions/measurement-and-control-solutions-mac/control-solutions/millstar/> (дата обращения: 02.03.2021).
26. Wu D. et al. Identifying grinding mill dynamics using acoustic beamforming and numerical modelling //Powder Technology. – 2020. – Т. 371. – С. 231-243. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.05.092.
27. Campbell J. J. et al. The collection and analysis of single sensor surface vibration data to estimate operating conditions in pilot-scale and production-scale AG/SAG mills //Proceedings of the XXII International Mineral Processing Congress, Cape Town, South Africa. – 2003. – С. 280-288.
28. Kuzba B. et al. Optimisation Platform for copper ore processing at the Division of Concentrator of KGHM Polska Miedz SA //E3S Web of Confer-

- ences. – 2016. – Т. 8. – С. 01037. DOI: 10.1051/e3sconf/20160801037.
29. Жуковский Ю. Л., Королёв Н. А., Бабанова И. С. Оценка технического состояния и остаточного ресурса электромеханического агрегата с асинхронным двигателем // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – №. 6. – С. 20-25.
30. Korolev N. A., Solovev S. V. AC motor diagnostics system based on complex parametric analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Т. 177. – №. 1. – С. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012007.
31. Kozjaruk A. E. et al. Currents in bearings of induction motors of electric drives with semiconductor converter // 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED). – IEEE, 2018. – С. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341707.
32. Weerasekara N. S., Liu L. X., Powell M. S. Estimating energy in grinding using DEM modelling // Minerals Engineering. – 2016. – Т. 85. – С. 23–33. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.10.013.
33. Djordjevic N., Shi F. N., Morrison R. Determination of lifter design, speed and filling effects in AG mills by 3D DEM // Minerals Engineering. – 2004. – Т. 17. – № 11–12. – С. 1135–1142. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.06.033.
34. Bian X. и др. Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation // Minerals Engineering. – 2017. – Т. 105. – С. 22–35. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.12.014.
35. Mishra B. K., Rajamani R. K. The discrete element method for the simulation of ball mills // Applied Mathematical Modelling. – 1992. – Т. 16. – № 11. – С. 598–604. DOI: 10.1016/0307-904X(92)90035-2.
36. Steyn C. W., Sandrock C. Benefits of optimisation and model predictive control on a fully autogenous mill with variable speed // Minerals Engineering. – 2013. – Т. 53. – С. 113–123. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.07.012.
37. Xie Q. и др. Operation Analysis of a SAG Mill under Different Conditions Based on DEM and Breakage Energy Method // Energies. – 2020. – Т. 13. – № 20. – С. 5247. DOI: 10.3390/en13205247.
38. Sychev, Y. A.; Zimin, R. Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices // Journal of Mining Institute. – 2021. – Т. 247. – С. 132-140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14
39. Igogo T. и др. Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches // Applied Energy. – 2021. – Т. 300. – С. 117375. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117375.
40. Li L., Wang X. Design and operation of hybrid renewable energy systems: current status and future perspectives // Current Opinion in Chemical Engineering. – 2021. – Т. 31. – С. 100669. DOI: 10.1016/j.coche.2021.100669.
41. Turysheva, A.; Voytyuk, I.; Guerra, D. Estimation of Electricity Generation by an Electro-Technical Complex with Photoelectric Panels Using Statistical Methods // Symmetry. – 2021. – Т. 13. – № 7. – С. 1278. DOI: 10.3390/sym13071278. DOI: 10.3390/sym13071278.
42. Behar O. и др. The use of solar energy in the copper mining processes: A comprehensive review // Cleaner Engineering and Technology. – 2021. – Т. 4. – С. 100259. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100259.
43. Australia steps up renewable grids [Электронный ресурс]. URL: <https://miningglobal.com/sustainability/australia-steps-renewable-grids> (дата обращения: 14.12.2021)
44. Vasilev B. U., Kozjaruk E. A. Research methods of increase efficiency algorithms pulse width modulation for semiconductor inverter // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2017. – С. 1-7. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076296.
45. Milling - energy intensive and high maintenance, overcoming the challenges using frequency converters [Электронный ресурс]. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK1074920731&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (дата обращения: 01.12.2021).
46. Bigger is better - ABB drive systems designed to power mega mills in mining [Электронный ресурс]. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3BHS%20814%20428%20ZAB%20E01&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (дата обращения: 01.12.2021).
47. Kovalchuk M. S., Baburin S. V. Modelling and control system of multi motor conveyor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – Т. 327. – №. 2. – С. 022065. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022065.
48. Васильев Б. Ю., Козьярук А. Е. Повышение эффективности асинхронных электроприводов с прямым управлением моментом // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2013. – Т. 13. – №. 2. – С. 75-84.
49. Alekseev V. V., Emel'yanov A. P., Kozjaruk A. E. Analysis of the dynamic performance of a variable-frequency induction motor drive using various control structures and algorithms // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Т. 87. – №. 4. – С. 181-188. DOI: 10.3103/S1068371216040027.
50. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика). [Электронный ресурс] – М.: 2013. – 72 с Режим доступа: [http://www.privod-news.ru/docs/Vector\\_Kalachev.pdf](http://www.privod-news.ru/docs/Vector_Kalachev.pdf).
51. Pedrayes F. et al. Frequency domain characterization of torque in tumbling ball mills using DEM modelling: Application to filling level monitoring // Powder Technology. – 2018. – Т. 323. – С. 433-444. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.10.026.
52. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – 2008.
53. Усольцев А. А., Лукичев Д. В. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – №. 10. – С. 35-41.

54. Сайт компании Metso. Шаровые мельницы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metso.com/products/grinding-mills/ball-mills/> (дата обращения: 01.12.2021).

55. Кулаев Н. А. и др. Учет намагничивания асинхронной машины при энергооптимальном управлении //Инженерный вестник Дона. – 2020. – №. 6 (66). – С. 12.

© 2022 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Жуковский Юрий Леонидович**, доцент кафедры электроэнергетики и электромеханики, директор учебно-научного центра цифровых технологий, Санкт-Петербургский горный университет (199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2), кандидат технических наук, доцент, zhukovskiy\_yul@pers.spmi.ru

**Малькова Яна Михайловна**, аспирант кафедры электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет (199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2), s215035@stud.spmi.ru

Заявленный вклад авторов:

Жуковский Ю.Л., Малькова Я.М. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-20-35

**Yuriy L. Zhukovskiy<sup>1</sup>, Yana M. Malkova<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>St. Petersburg mining university

\*E-mail: s215035@stud.spmi.ru

## CLASSIFICATION OF WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF THE COMMINUTION AND IMPLEMENTATION OF ENERGY-EFFICIENT ALGORITHMS FOR CONTROLLING THE TWIN-MOTOR ELECTRIC MILL DRIVE

### Abstract.

The comminution is the most energy-intensive at mining and processing plants. According to the distribution of energy costs, the grinding process accounts for more than 50% of the total costs of the plant. The use of drum mills is widespread in the production process. The principle of comminution in drum mills does not allow reducing the energy costs of this process significantly. The article presents a classification of ways to improve the efficiency of the grinding process, based on the world practices and researches of the leading countries in ore processing. The classification includes algorithmic ways to increase the efficiency of comminution process by means of using an automated electric mill drive. Particular attention is paid to the introduction of advanced control systems based on digital modeling as one of the tools to improve the efficiency of the grinding process. Researches in Matlab Simulink were carried out, and their results obtained the effect of modification of motor control system. The developed algorithms in the field-oriented control system of electric drive provide the uniform distribution of loads in two-motor electric drive and reduction of current consumption. Application of improved algorithms of electric drive control is one of the examples of energy efficiency increase. Further contribution to the rational use of energy resources requires the introduction of comprehensive measures according to the classification of ways to improve.



### Article info

Received:  
02 June 2021

Accepted for publication:  
15 July 2022

Accepted:  
04 August 2022

**Keywords:** energy efficiency, comminution, drum mills, automated electric drive, control systems, sustainable development.

**For citation:** Zhukovskiy Yu.L., Malkova Ya.M. Classification of ways to improve the efficiency of the comminution and implementation of energy-efficient algorithms for controlling the twin-motor electric mill drive. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2022; 4(162):20-35 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-20-35

#### REFERENCES

1. Take Action for the Sustainable Development Goals - United Nations Sustainable Development [Electronic resource]. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (reference date: 01.03.2022).
2. Litvinenko, V.S.; Tsvetkov, P.S.; Dvoynikov, M.V.; Buslaev, G.V. Barriers of implementation of hydrogen initiatives in the context of sustainable development of global energy. *Journal of the Mining Institute* 2020, Vol. 244, pp. 428-438. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.5
3. Filatova, I.; Nikolaichuk, L.; Zakaev, D.; Ilin, I. Public-private partnership as a tool of sustainable development in the oil-refining sector: Russian case. *Sustainability (Switzerland)* 2021, Vol. 13(9), p. 5153. DOI: 10.3390/su13095153.
4. Zhukovskiy Y. L. и др. Fossil Energy in the Framework of Sustainable Development: Analysis of Prospects and Development of Forecast Scenarios. *Energies* 2021, Vol. 14(17), p. 5268. DOI: 10.3390/en14175268.
5. Fedoseyev, S.V.; Tsvetkov, P.S. Key factors in public perception of carbon dioxide capture and disposal projects. *Proceedings of the Mining Institute* 2019, Vol. 237, pp. 361-368. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.361.
6. Koteleva, N.; Buslaev, G.; Valnev, V.; Kunsch, A. Augmented Reality System and Maintenance of Oil Pumps. *International Journal of Engineering* 2020, Vol. 33(8), pp. 1620-1628. DOI: 10.5829/ije.2020.33.08b.20.
7. Shabalov M. Y. et al. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector. *Energy Reports* 2021, Vol. 7, pp. 2664-2680. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.05.001.
8. Zhukovskiy Y. et al. Scenario Modeling of Sustainable Development of Energy Supply in the Arctic. *Resources* 2021, Vol. 10(12), p. 124. DOI: 10.3390/resources10120124.
9. Cherepovitsyn, A.E.; Lipina, S.A.; Evseeva, O.O. Innovative approach to the development of mineral and raw material potential of the Arctic zone of Russia. *Notes of the Mining Institute* 2018, Vol. 232, pp. 438-444. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.
10. Ustoychivoye razvitiye [Electronic resource]. URL: <https://www.phosagro.ru/sustainability/> (reference date: 01.12.2021).
11. Polus [Electronic resource]. URL: <https://sustainability.polyus.com/ru/> (reference date: 01.12.2021).
12. Ustoychivoye razvitiye | Polymetal [Electronic resource]. URL: <https://www.polymetalinternational.com/ru/sustainability/> (reference date: 01.12.2021).
13. Bortnowski P. и др. Energy Efficiency Analysis of Copper Ore Ball Mill Drive Systems. *Energies* 2021, Vol. 14(6), p 1786. DOI: 10.3390/en14061786.
14. Góralczyk M. и др. Increasing Energy Efficiency and Productivity of the Comminution Process in Tumbling Mills by Indirect Measurements of Internal Dynamics—An Overview. *Energies* 2020, Vol. 13(24), p. 6735. DOI: 10.3390/en13246735.
15. Bouchard J., Desbiens A., Poulin É. Reducing the energy footprint of grinding circuits: the process control paradigm. *IFAC-PapersOnLine* 2017, Vol. 50(1), pp. 1163–1168. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.402.
16. Jeswiet J., Szekeres A. Energy Consumption in Mining Comminution. *Procedia CIRP* 2016, Vol. 48, pp. 140–145. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.250.
17. Home - CEEC (Coalition for Eco Efficient Comminution) [Electronic resource]. URL: <https://www.ceecthefuture.org/> (reference date: 14.12.2021).
18. Meng R. A Survey and Analysis on Electricity Consumption of Raw Material Mill System in China Cement Industry between 2014 and 2019. *Sustainability* 2021, Vol. 13(3), p. 1126. DOI: 10.3390/su13031126.
19. Cleary P. W., Owen P. Effect of operating condition changes on the collisional environment in a SAG mill. *Minerals Engineering* 2019, Vol. 132, pp. 297–315. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.06.027.
20. Yin Z. и др. Effect of Lifter Shapes on the Mill Power in a Ball Mill. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2018, Vol. 452(4), p. 042201. DOI: 10.1088/1757-899X/452/4/042201.
21. Vertimill® - Metso Outotec [Electronic resource]. URL: <https://www.mogroup.com/es/portafolio/vertimill/?r=1> (reference date: 14.12.2021).
22. IsaMill™ [Electronic resource]. URL: <https://www.glencoretechnology.com/en/technologies/isamill> (reference date: 14.12.2021).
23. Kafarov V. V., Glebov M. B. *Matematicheskoye modelirovaniye osnovnykh pro-tsessov khimicheskikh proizvodstv.* – 1991.
24. Aleksandrov A. V., Litvinova N. M. *Ekspierimental'no-teoreticheskiye issledovaniya protsesssa iz-*



mel'cheniya rud. Gornyy informatsi-onno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal) 2009, Vol. 4(12), pp. 242-249.

25. Measurement and Control | Mintek [Electronic resource]. URL: <https://www.mintek.co.za/technical-divisions/measurement-and-control-solutions-mac/control-solutions/millstar/> (reference date: 02.03.2021).

26. Wu D. et al. Identifying grinding mill dynamics using acoustic beamforming and numerical modelling. *Powder Technology* 2020, Vol. 371, pp. 231-243. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.05.092.

27. Campbell J. J. et al. The collection and analysis of single sensor surface vibration data to estimate operating conditions in pilot-scale and production-scale AG/SAG mills. *Proceedings of the XXII International Mineral Processing Congress, Cape Town, South Africa 2003*, pp. 280-288.

28. Kuzba B. et al. Optimisation Platform for copper ore processing at the Division of Concentrator of KGHM Polska Miedz SA. *E3S Web of Conferences* 2016, Vol. 8, p. 01037. DOI: 10.1051/e3sconf/20160801037.

29. Zhukovskiy YU. L., Korolov N. A., Babanova I. S. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa elektromekhanicheskogo agregata s asinkhronnym dvigatelem. *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika* 2017, Vol. 6, pp. 20-25.

30. Korolev N. A., Solovev S. V. AC motor diagnostics system based on complex parametric analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2017, Vol. 177(1), p. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012007.

31. Kozjaruk A. E. et al. Currents in bearings of induction motors of electric drives with semiconductor converter. *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED) IEEE 2018*, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341707.

32. Weerasekara N. S., Liu L. X., Powell M. S. Estimating energy in grinding using DEM modelling. *Minerals Engineering* 2016, Vol. 85, pp. 23-33. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.10.013.

33. Djordjevic N., Shi F. N., Morrison R. Determination of lifter design, speed and filling effects in AG mills by 3D DEM. *Minerals Engineering* 2004, Vol. 17. (11-12), pp. 1135-1142. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.06.033.

34. Bian X. Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation. *Minerals Engineering* 2017, Vol. 105, pp. 22-35. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.12.014.

35. Mishra B. K., Rajamani R. K. The discrete element method for the simulation of ball mills. *Applied Mathematical Modelling* 1992, Vol. 16(11), pp. 598-604. DOI: 10.1016/0307-904X(92)90035-2.

36. Steyn C. W., Sandrock C. Benefits of optimisation and model predictive control on a fully autogenous mill with variable speed. *Minerals Engineering* 2013, Vol. 53, pp. 113-123. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.07.012.

37. Xie Q. и др. Operation Analysis of a SAG Mill under Different Conditions Based on DEM and

Breakage Energy Method. *Energies* 2020, Vol. 13(20), p. 5247. DOI: 10.3390/en13205247.

38. Sychev, Y. A.; Zimin, R. Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices. *Journal of Mining Institute* 2021, Vol. 247, pp. 132-140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14

39. Igogo T. и др. Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches. *Applied Energy* 2021, Vol. 300, p. 117375. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117375.

40. Li L., Wang X. Design and operation of hybrid renewable energy systems: current status and future perspectives. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2021, Vol. 31, p. 100669. DOI: 10.1016/j.coche.2021.100669.

41. Turysheva, A.; Voytyuk, I.; Guerra, D. Estimation of Electricity Generation by an Electro-Technical Complex with Photoelectric Panels Using Statistical Methods. *Symmetry* 2021, Vol. 13(7), p. 1278. DOI: 10.3390/sym13071278. DOI: 10.3390/sym13071278.

42. Behar O. и др. The use of solar energy in the copper mining processes: A comprehensive review. *Cleaner Engineering and Technology* 2021, Vol. 4, p. 100259. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100259.

43. Australia steps up renewable grids [Electronic resource]. URL: <https://miningglobal.com/sustainability/australia-steps-renewable-grids> (reference date: 14.12.2021)

44. Vasilev B. U., Kozjaruk E. A. Research methods of increase efficiency algorithms pulse width modulation for semiconductor inverter. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) IEEE 2017*, pp. 1-7. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076296.

45. Milling - energy intensive and high maintenance, overcoming the challenges using frequency converters [Electronic resource]. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK1074920731&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (reference date: 01.12.2021).

46. Bigger is better - ABB drive systems designed to power mega mills in mining [Electronic resource]. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3BHS%20814%20428%20ZAB%20E01&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (reference date: 01.12.2021).

47. Kovalchuk M. S., Baburin S. V. Modelling and control system of multi motor conveyor *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2018, Vol. 327(2), p. 022065. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022065.

48. Vasilev B. Yu., Kozyaruk A. Ye. Povysheniye effektivnosti asinkhronnykh elektroprivodov s pryamym upravleniyem. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* 2013, Vol. 13(2), pp. 75-84.

49. Alekseev V. V., Emelyanov A. P., Kozyaruk A. E. Analysis of the dynamic performance of a varia-

ble-frequency induction motor drive using various control structures and algorithms. Russian Electrical Engineering 2016, Vol. 87(4), pp. 181-188. DOI: 10.3103/S1068371216040027.

50. Kalachev Yu. N. Vektornoe regulirovanie (zametki practica) [Electronic resource]—M.: 2013, pp. 72 // Access mode: [http://www. privod-news.ru/docs/Vector\\_Kalachev.pdf](http://www.privod-news.ru/docs/Vector_Kalachev.pdf).

51. Pedrayes F. et al. Frequency domain characterization of torque in tumbling ball mills using DEM modelling: Application to filling level monitoring. Powder Technology 2018, Vol. 323, pp. 433-444. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.10.026.

52. Vinogradov A. B. Vektornoe upravleniye elektroprivodami peremennogo toka 2008.

53. Sol'tsev A. A., Lukichev D. V. Opredele-niye parametry asinkhronnogo dvigatelya po spravochnym dannym. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy 2008, Vol. 51(10), pp. 35-41.

54. Sayt kompanii Metso. Sharovyye melnitsy [Electronic resource]. URL: <https://www.metso.com/products/grinding-mills/ball-mills/> (reference date: 01.12.2021).

55. Kulayev N. A. i dr. Uchet namagnichivaniya asinkhronnoy mashiny pri energooptimal'nom upravlenii. Inzhenernyy vestnik Dona 2020, Vol. 6 (66), p. 12.

© 2022 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

**Yuriy L. Zhukovskiy**, Associate Professor, Department of Electric Power Engineering and Electromechanics, Director of Educational and Research Center for Digital Technologies, St. Petersburg mining university (199106, Russia, Saint-Petersburg, Vasilevskiy Island, 21 line 2), [zhukovskiy\\_yul@pers.spmi.ru](mailto:zhukovskiy_yul@pers.spmi.ru)

**Yana M. Malkova**, postgraduate student, Department of Electric Power Engineering and Electromechanics, St. Petersburg mining university (199106, Russia, Saint-Petersburg, Vasilevskiy Island, 21 line 2), [s215035@stud.spmi.ru](mailto:s215035@stud.spmi.ru)

Contribution of the authors:

Zhukovskiy Y.L., Malkova Y.M. – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Author have read and approved the final manuscript.

