

Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2006. – № 8 (102). – С. 83 – 92.

6. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография / В.Б. Клепиков. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2014. – 408 с.

7. Шахтарь П.С. Рудничные локомотивы. М.: Недра. – 1982. – 272 с.

8. Синчук О.М. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый; под ред. докт. техн. наук, проф. О.Н. Синчука. – Кривой Рог - Донецк: ЧП Щербатых А. В., 2015. – 296 с.

9. Синчук О.Н., Беридзе Т.М., Гузов Э.С. Системы управления рудничным электровозным транспортом, – М.: Недра, 1993. – 255 с.

10. Чермалых В.М. Исследование оптимальных по динамичности систем подъема глубоких шахт: дис.. д-ра техн. наук / В.М. Чермалых. - Днепропетровск, 1970. – 420 с.

Рукопись поступила в редакцию 16.04.16

УДК 622.625.28-83

А.Б. СЕМОЧКИН, канд. техн. наук, доцент, В.А. ФЕДОТОВ, ст. преподаватель

Криворожский национальный университет

Л.В. СМЕНОВА, ст. преподаватель

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

## АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВАГОНЕТОК РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОСОСТАВОВ ПРИ ПОГРУЗОЧНО РАЗГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

В статье рассмотрены вопросы уменьшения времени погрузки-разгрузки электровозосоставов в специфических условиях железорудных предприятий с подземными способами ведения горных работ.

Установлено, что при погрузочно-разгрузочных операциях, на которые приходится большая часть цикла движения электровозосоставов в подземных горных выработках, электропоезд передвигается рывками, при этом зазоры в сцепных устройствах ухудшают точность позиционирования вагонеток под погрузочными люками, а, следовательно, увеличивают время выполнения этой технологической операции и, кроме того, вызывают удары, снижающие срок службы слагаемых составов.

Проведен сравнительный анализ различных математических подходов для решения задачи минимизации этого вида ударов путем создания соответствующего алгоритма управления тяговой электромеханической системой электровоза. В числе анализируемых методы: длинноволнового приближения цепочки связанных осцилляторов, идентификации объекта управления, теории планирования экспериментов, нечеткого и нейросетевого регулирования.

Установлено, что из исследуемого перечня методов следует исключить метод нечеткого управления, а остальные подходы подлежат более глубокой проработке для достижения поставленной цели.

**Ключевые слова:** шахтный электропоезд, управление перемещением, математические подходы

**Проблема** и ее связь с научными и практическими заданиями. Электрический транспорт, как и прежде, - основной вид внутришахтного транспорта (ВШТ) горных предприятий с подземными способами ведения работ [1, 2]. В отличие от угольных, 100 % грузоперевозок железорудных предприятий (шахт, рудников) осуществляется электровозами с адресным закреплением составов, т. е. электровоз-вагонетка составляют единый модуль [3]. К сожалению, производительность электровозосоставов отечественных железорудных шахт в последнее десятилетие имеет тенденцию к снижению, что сказывается на себестоимости добываемого железорудного сырья, основного отечественного продукта для пополнения валютных запасов Украины [4]. Корни такого положения кроются, прежде всего, в увеличении длин подземных транспортных магистралей в связи с понижением уровня ведения работ. В силу этого изменяются и временные показатели цикла движения электровозосоставов: погрузка – движение с грузом – разгрузка – движение порожняком [5]. В табл. 1 представлены временные характеристики работы электровозосоставов по слагаемым цикла движения. Как следует из табл. 1, значительная часть времени – 35 – 50% цикла движения относится к процессу погрузки-разгрузки составов. Учитывая, что скорость движения электровозосоставов в магистральных подземных горных выработках - квершлагах строго ограничена соответствующими правилами [6] по величине тормозного пути состава и в переводе на скорость движения составляет 12-15 км/ч, т. е. не может быть увеличена для уменьшения времени цикла движения, то единственный реальный путь умень-

шения времени цикла движения - это сокращение сегмента времени погрузки-разгрузки состава. Последнее, в свою очередь, в значительной степени, определяется временем перестановки вагонеток во время этих процессов, и зависит, прежде всего от мастерства (навыков) машиниста электровоза по четкости установки вагонеток под погрузочным люком или в опрокиде при разгрузке.

Таблица 1

Укрупненные показатели распределения времени в цикле движения электровозосоставов по откаточным горизонтам шахт ПАО «Криворожжелезрудком» (г. Кривой Рог)

	Время, мин	Усредненные показатели в цикле одного рейса движения состава (%)
«Порожняк» по откаточному штреку	15-25 мин	25%
С грузом по откаточному штреку	13-20 мин	20%
Погрузка	10-30 мин	30-35%
Разгрузка	5 мин	5-15%
Маневры	3-5 мин	3-5%

**Цель исследований.** Разработка предложений по выбору математического аппарата для строения алгоритма управления тяговым электромеханическим комплексом рудничного электровоза при функционировании электровозосостава в цикле погрузка-разгрузка.

**Результаты исследований.** Направление достижения вышеизложенной цели, а следовательно выбор тактики исследований, носит не однозначный характер. С одной стороны, для уменьшения времени погрузки (разгрузки) состава, а следовательно увеличения производительности функционирования всего комплекса ВШТ, следует увеличить скорость разгрузки-погрузки вагонеток, с другой - следует предотвратить упругие удары в сцепных устройствах вагонеток, которые естественны при ускоренном перемещении их на требуемые технологией погрузки-разгрузки короткие расстояния перестановки под погрузочным люком или в опрокиде. Установлено [7], что упругие удары в сцепных устройствах шахтных электровозосоставов могут достигать значительных величин из-за того, что соединительные звенья сцепных устройств, обеспечивая возможность переворота вагонетки для разгрузки руды, имеют для этого значительный люфт в десятки сантиметров [8]. Поэтому решение задачи точного позиционирования вагонеток в процессе разгрузки-погрузки актуальная научная задача, которую можно будет считать решенной, если перемещения вагонеток будут происходить максимально быстро, приемлемо точно, и с минимизацией или точнее оптимизацией предельных величин упругих ударов. Вместе с тем, решение этой задачи осложняется рядом обстоятельств:

Из-за того, что в рудничных составах для сочленения вагонеток применяются не автосцепки, а упрощенный вариант сцепок, то в последних наблюдаются значительные люфты в сцепных устройствах, что в общем случае приводит к системе с  $N$  степенями свободы (где  $N$  - число слагаемых единиц электровозосостава).

Просыпи на путях, которые в общем случае делают случайной функцию сопротивления движению единиц состава во времени и пространстве.

Разброс степени загрузки вагонеток рудой.

Наличие силы трогания, обусловленной свойствами скользящих пар трения (в подшипниках).

Отсутствие плавности регулирования скорости в релейно-контакторных схемах управления тяговым приводом постоянного тока, которым пока, что оснащены большинство шахтных электровозов, эксплуатируемых в отечественных шахтах и рудниках.

Перед изложением материалов дальнейших исследований отметим ряд небезынтесных для изыскательского процесса примечаний:

для перевода системы шахтного электровозосостава в систему с одной степенью свободы необходимо следить за тем, чтобы во время переходных процессов не происходило размыкания предварительно натянутых сцепных устройств.

Очевидно, что из-за значительных сил сопротивления движению это сравнительно легко обеспечить за счет не превышения темпов движения электровоза выше некоторой величины (а именно ограничения рывков при разгоне и торможении).

Становится ясным, что предварительное осаживание состава, практикуемое в шахтах для облегчения дальнейшего разгона, можно исключить из дальнейшего рассмотрения;

формирование начальных условий переходного процесса при останове электровозосостава имеет определяющее значение для качества дальнейшего управления.

Это особенно касается детерминированных систем управления, которые обычно опираются на наперед известные сигналы.

Очевидно, если начальные условия переходного процесса электровозосостава представляют собой некоторое «вероятностное облако», в котором каждый исходный параметр имеет вероятностный разброс в некоторых пределах, то это автоматически приводит к увеличению неопределенности при формировании детерминированной системы управления электровозосоставом.

В шахтном электропоезде использование различных датчиков (скорости, силы упругости, относительного перемещения) для каждой вагонетки неприемлемо в силу следующих причин: затруднена передача информации с каждой вагонетки на центральный блок управления (даже самый примитивный проводной способ неприемлем из-за опрокида вагонетки); невысокая надежность эксплуатации всех этих датчиков из-за повышенных вибраций, трясок, опасности попадания на них кусков транспортируемого материала, и пр; высокая стоимость капиталовложений в систему управления с повышенными эксплуатационными расходами на поддержание всей автоматики в рабочем состоянии.

Для решения задачи управления аналитическими способами, с учетом вышеприведенных рассуждений, авторами была разработана программная модель электровозосостава с восемью вагонетками, общий вид которой приведен на рис. 1.

В этой модели на основании экспериментальных исследований были учтены все основные особенности шахтного электровозосостава: люфт в сцепных устройствах 0,2 м, наличие буферных пружин вагонеток жесткостью 50000 Н·м, сопротивление вязкого трения амортизаторов величиной 75000, начальное усилие сопротивления троганию 100 Н и т.д.

В качестве примера на рис. 2,3,4 приведены полученные графики переходных процессов упругих усилий, скоростей и перемещений вагонеток.

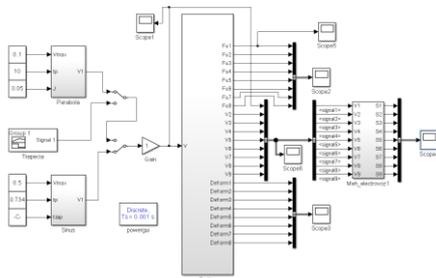


Рис. 1. Модель шахтного электровозосостава

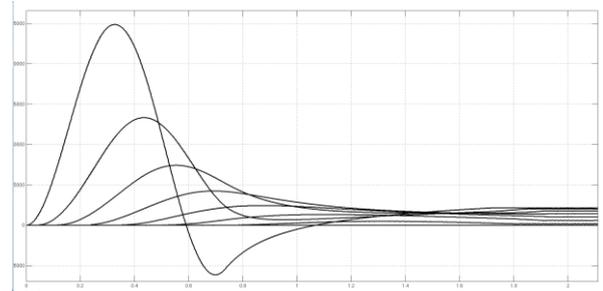


Рис. 2. Упругие усилия в сцепных устройствах

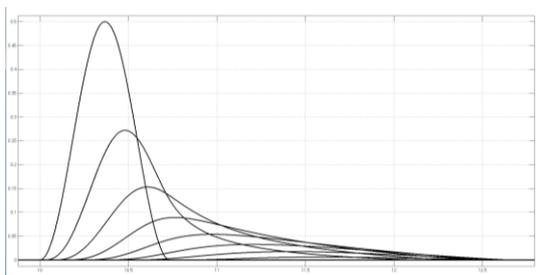


Рис. 3. Скорости электровоза и шахтных вагонеток

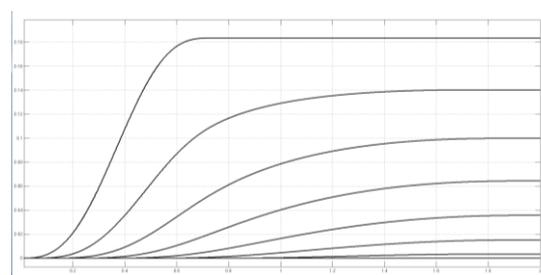
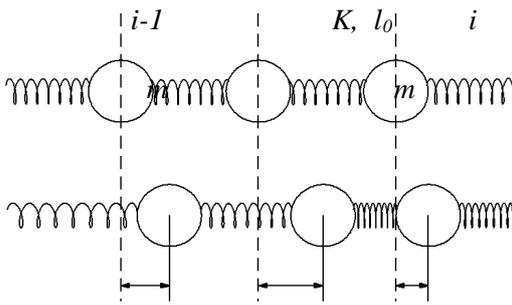


Рис. 4. Перемещения шахтных вагонеток

Для дальнейших исследований, необходимо разработать закон управления, который будет реализовывать точное и безударное перемещение вагонеток на требуемые расстояния с любого исходного положения.

Рассмотрим более подробно различные варианты математических подходов к решению этой задачи.

*Длинноволновое приближение системы связанных осцилляторов.* Представим шахтный электровозосостав как систему N-связанных осцилляторов, как показано на рис. 5.

Рис. 5. Система  $N$  связанных осцилляторов

$$\xi(x, t) = A \sin(\omega_0 t - kx + \varphi_0),$$

где  $\omega_0$  - циклическая частота волны,  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число,  $\lambda$  - длина волны,  $\omega_0 t - kx + \varphi_0$  - фаза волны.

Рассмотренное приближение является хорошей моделью для описания упругих волн в стержнях. При наличии силы трения гармоническая волна будет иметь несколько иной вид

$$\xi(x, t) = A e^{-\beta t} \sin(\omega_0 t - kx + \varphi_0),$$

то есть амплитуда колебаний будет затухать по экспоненциальному закону -  $A = A_0 e^{-\beta t}$ .

**При идентификации объекта управления.** При идентификации предполагается экспериментальное изучение и сопоставление входных и выходных процессов, и задача идентификации состоит в выборе соответствующей математической модели [10]. Модель должна быть такой, что ее реакция и реакция объекта на один и тот же входной сигнал должны быть, в известном смысле, близкими. Результаты решения задачи идентификации являются исходными данными для проектирования систем управления, оптимизации, анализа параметров систем и т. д. Использование математического аппарата идентификации систем самого начала предполагает наличие некоторого черного ящика, для которого нужно составить математическое описание, связывающее выходную координату (перемещение) со входной координатой (входное воздействие). Получив более или менее адекватную математическую модель «черного ящика», нет никакой гарантии, что мы сможем по заданному перемещению определять требуемое входное воздействие (решить задачу управления). Не стоит забывать, что математической моделью, реализованной на Матлабе, мы все-таки уже располагаем (то есть у нас уже не «черный ящик» - см. рис. 2), и нашу самую главную задачу - как по заданному перемещению определять требуемое входное воздействие, можно попытаться решить и с помощью указанной модели. Единственное, на что стоит рассчитывать - что полученный результат идентификации по форме будет намного проще исходной модели, и иметь приемлемую точность.

**Теория планирования экспериментов.** Эта теория [11] позволяет, располагая неким экспериментальным объектом (в нашем случае - моделью рис. 2), выполнить ряд экспериментов на этой модели при различных специально выбранных исходных условиях, и, обработав специальным образом полученные экспериментальные данные, получить в итоге функцию отклика - в нашем случае это зависимость величины перемещения вагонеток в функции величин факторов эксперимента. Эта теория позволяет нам более осознанно по сравнению с процедурой идентификации определить набор факторов, влияющих на конечный результат, а значит вероятность получения адекватной функции отклика будет выше, чем с помощью методов идентификации. С другой стороны, количество значимых факторов может быть настолько большим, что придется выполнить слишком большое количество экспериментов, то есть процесс решения задачи управления может стать чересчур громоздким.

**Нечеткое управление.** Так как ранее было сказано о неопределенности начальных условий переходного процесса, при том, что поставленная нами задача управления предельно ясна, то, возможно, имеет смысл попробовать использовать нечеткие множества для построения регулятора, который, опираясь на вероятностный характер исходной информации, сможет реализовать достаточную точность позиционирования [12]. Однако, для построения базы нечетких правил требуются достаточно глубокие знания в явлениях механики, в том числе и волновой,

Если смещения тел из положения равновесия малы по сравнению с расстоянием между телами  $\xi_i \ll l_0$  для любого  $i$ , то эту систему можно описать в виде волнового уравнения [9]

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} = v^2 \frac{d^2 \xi}{dx^2},$$

где  $v = \omega l_0$ , то есть мы перешли от дискретного набора тел к непрерывному распределению - континуальное приближение.

В частности, решением волнового уравнения является гармоническая волна

которой мы, электротехники по образованию, не располагаем в достаточной мере, поэтому не можем выступить в качестве экспертов, способных предоставить информацию в базу знаний. Вторым не менее серьезным недостатком использования нечеткого регулятора есть необходимость использования каких-либо сигналов обратной связи – нечеткий регулятор не может работать «вслепую».

**Нейросетевое управления.** Этот способ управления довольно перспективен для решения данной задачи управления тяговыми электромеханическими комплексами рудничного электровозосостава [12]. Из литературы известно, что нейронные сети успешно применяются для синтеза систем управления динамическими объектами. Нейросети обладают рядом уникальных свойств, которые делают их мощным инструментом для создания систем управления: способностью к обучению на примерах и обобщению данных, способностью адаптироваться к изменению свойств объекта управления и внешней среды, пригодностью для синтеза нелинейных регуляторов, высокой устойчивостью к повреждениям своих элементов в силу изначально заложенного в нейросетевую архитектуру параллелизма.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения — одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искаженных данных.

Нейроуправление, в отличие от нечеткого управления, обладает двумя значительными преимуществами:

нейрорегулятор способен работать без сигналов обратной связи (обратные связи для него нужны только на период обучения, нечеткому регулятору обратные связи нужны всегда);

нейрорегулятор способен обрабатывать ситуации, которые отсутствовали при обучении, то есть вероятность правильного переходного процесса при работе нейрорегулятора выше, чем при работе нечеткого регулятора.

Приведенные результаты анализа возможных направлений аналитических исследований позволяют сделать следующие заключение.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Анализ возможностей различных математических подходов для решения задачи построения алгоритма управления тяговой электромеханической системой электровозов рудничных составов с требуемым уровнем точного безударного управления при погрузочно-разгрузочных операциях, позволяют сделать вывод, что наиболее перспективными математическими подходами для решения этой задачи являются: подход длинноволнового приближения, идентификации объекта управления и нейросетевого управления. Именно эти подходы следует принять в качестве ориентиров при решении задачи строения системы управления электровозосоставом – либо все вместе для дальнейшего сравнения, либо какой-то произвольно выбранный из них.

#### *Список литературы*

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. - М.: Недра, 1981. — 389 с.
2. Дебелый В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый, С.А. Мельников // Уголь Украины. - 2006. - №6. - С.30-31.
3. Синчук О.Н. Системы управления рудничным электровозным транспортом / О.Н. Синчук, Т.М. Беридзе, Э.С. Гузов. – М.: Недра, 1993. – 254 с.
4. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009-2010 гг.: Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг.: / Е.К. Бабец, Л.А. Штанько, В.А. Салганик, И.Е. Мельникова и др. – Кривой Рог: Видавничий дiм. 2011. – 329 с.
5. Черная, В.О. К анализу псевдоаварийных режимов функционирования тяговых электротехнических комплексов рудничных электровозов / В.О. Черная // Проблемы недропользования: международный форум-конкурс молодых ученых: сборник научных трудов. Часть 1. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 239–241.
6. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом. – 3-е изд. – М.: Недра, 1987. – 223 с.
7. Шахтарь П.С. Динамические процессы в рудничных локомотивах и методика расчета параметров механической части. Диссертационная работа на соискание ученой степени доктора технических наук. – Донецк, 1974. – 224 с.

8. Сінчук О.М. Research of electromagnetic processes in traction electromechanical complexes with IGBT-converters at resistor braking of electric motors / Сінчук О.М., Сінчук І.О., Якимець С.Н., Лесной Н.И., Скапа Е.И // Наукові праці ДНТУ. Серія «Елетротехніка і енергетика» №11 (186) Донецьк, ДНТУ, 2011.С. 365 – 368.
9. Тарасевич Ю.Ю., Водолазская И.В. Колебания и волны / Тарасевич Ю.Ю., Водолазская И.В. Учебное пособие. – Астрахань: Астраханский государственный университет. 2004. – 79 с.
10. Крауфорд Ф. Волны. М.: Наука. – 2000. – 521 с.
11. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. – 432 с.
12. Ивоботенко Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
13. Пупков К.А. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Пупков К.А., Егунов Н.Д., Зверев В.Ю. и др.: Учебник. Под ред. Н.Д. Егунова; издание 2-ое, стереотипное. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 744 с., ил.

Рукопись поступила в редакцию 20.04.16

УДК 681.513.6

В.О. КОНДРАТЕЦЬ, д-р техн. наук, проф., А.М. МАЦУЙ, канд. техн. наук, доц.  
Кіровоградський національний технічний університет

## МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПОДРІБНЕННЯМ РУДИ КУЛЬОВИМ МЛИНОМ З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ДИНАМІКИ РОЗРІДЖЕННЯ ПУЛЬПИ

Метою роботи є розробка методу автоматизованого керування подрібненням руди кульовими млинами з оптимізацією динаміки розрідження пульпи та включенням в продуктивну роботу початкової ділянки барабана технологічного агрегата. Поставлена мета досягається автоматизованим керуванням на двох ієрархічних рівнях. Перший ієрархічний рівень керування здійснюється в межах стабілізації загального розрідження пульпи в кульовому млині з заданою точністю.

Другий ієрархічний рівень керування реалізовано в межах першого використовуючи загальну витрату води у кульовий млин для досягнення заданого розрідження пульпи. Загальна витрата води розподіляється між адаптивними контурами керування витратою води на поверхню руди, що направляється в млин, в приймальній пристрій завиткового живильника та безпосередньо в технологічний агрегат. Обидва контури виконані оптимальними і реалізують релейний закон керування. Завдання на розрідження пульпи формується автоматично в кожному циклі керування, адаптованому до швидкості руху конвеєрної стрічки. Доведені всі положення і залежності, на які спирається даний метод, зокрема, критерії оптимальності, алгоритми визначення площі поверхні рухомої дробленої руди, витрати води у приймальній пристрій завиткового живильника та середньої крупності дробленого матеріалу.

Вперше запропоновані залежності для визначення крупності дробленої руди в потоці, площі поверхні рухомого дробленого матеріалу, а також спосіб автоматизованого керування подрібненням руди з оптимізацією динаміки розрідження пульпи.

Реалізація запропонованого методу керування забезпечує включення в продуктивну роботу початкової ділянки барабана млина, що дорівнює  $\frac{1}{4} \dots \frac{1}{3}$  його довжини. Це гарантує збільшення продуктивності за готовим продуктом до 7%, зменшення втрат корисного компонента без перевитрати електричної енергії, куль і футеровки.

**Ключові слова:** подрібнення руди, пульпа, оптимізація розрідження, адаптивне розподілене керування, поверхня твердого.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Основною сировиною чорної металургії України є концентрат збагачених залізних руд. Підвищена вартість вітчизняного концентрату порівняно з зарубіжною сировиною значно зменшує конкурентоспроможність як самої продукції збагачувальної галузі, так і продукції чорної металургії. Такий стан склався в основному в наслідок великих втрат електроенергії, куль і футеровки в перших стадіях подрібнення, які необхідно терміново зменшувати. Тому дана стаття спрямована на розв'язання Галузевої програми енергоефективності та енергозбереження на період до 2017 р., затвердженої наказом Міністра промислової політики України №152 від 25.02.2009 року, в частині гірничо-металургійного комплексу, та держбюджетної теми «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (державний реєстраційний номер 0115U003942) плану науково-дослідних робіт Кіровоградського національного технічного університету.

**Аналіз досліджень і публікацій.** На необхідність покращення керування даним технологічним процесом звертається увага в роботах [1-5]. Таке керування повинно спиратись на особливості цих технологічних процесів. Технологічні основи вирішення даної проблеми частково розглянуті в роботах останніх років [6, 7]. Аналіз підходів до автоматизації процесів подріб-