

В. А. ФЕДОТОВ, ст. преподаватель, А. Б. СЁМОЧКИН, канд. техн. наук, доц.  
Криворожский национальный университет

## **К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВАГОНЕТОК ЭЛЕКТРОВЗОСОСТАВОВ ПРИ ПОГРУЗОЧНО–РАЗГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ В УСЛОВИЯХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ШАХТ КРИВБАССА**

**Цель.** В настоящее время в железорудных шахтах Кривбасса среди локомотивов шахтного рельсового транспорта преимущественное распространение имеют контактные виды электровозов постоянного тока с релейно-контакторной системой управления. Такая система привода устарела и не соответствует современным требованиям уровня экономичности и технологичности обслуживания. Однако при отсутствии средств на кардинальное обновления парка электровозов, в качестве одного из вариантов модернизации данных видов электровозов, а также систем их тягового привода, является автоматизация погрузочно-разгрузочных работ электропоездов в подземных условиях железорудных шахт.

**Методы.** При оценке возможностей автоматизации точного позиционирования вагонеток использовались некоторые теоретические положения прикладной механики, физики, элементы теории автоматического управления электроприводами, элементы теории электрических машин, методы дискретного преобразования сигналов, методы математического моделирования.

**Научная новизна.** В настоящее время, невзирая на долгую историю использования электровозов постоянного тока с релейно-контакторным управлением, отсутствуют результаты детальных исследований динамических режимов методами математического моделирования. Несмотря на то, что указанные системы привода во всем мире устарели, в условиях Кривбасса до сих пор актуальными являются задачи частичной модернизации прежней системы привода электровозов для повышения экономической эффективности их использования.

**Практическое значение.** Автоматизация точного позиционирования вагонеток при погрузочно-разгрузочных операциях предполагает интенсификацию использования внутришахтного транспорта на базе старого оборудования, создание эффективной системы управления тяговым электроприводом, на базе которой должна строиться система управления работой всего тягового комплекса электровоза как в ручном, так и автоматическом режимах.

**Результаты.** В статье приведены результаты исследований динамических процессов в электровозосоставе с электроприводом постоянного тока с релейно-контакторным управлением и результаты оценки перспективы модернизации тягового электропривода с помощью автоматизации точного позиционирования вагонеток под разгрузку, в условиях железорудных шахт Кривбасса.

**Ключевые слова:** контактный электровоз, переходные процессы, двигатели постоянного тока, точное позиционирование.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-103-168-173

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Основным видом транспорта отечественных горнометаллургических предприятий с технологиями подземного ведения работ является электровозный, обеспечивающий 100% грузоперевозок товарной железной руды [1]. В общем объеме энергопотребления подземных предприятий доля внутришахтного транспорта на ряде шахт достигает 29 % от общего объема энергопотребления [1].

**Анализ исследований и публикаций.** За все годы использования в Украине на шахтном электровозном транспорте систем привода релейно-контакторной системы управления – двигатель постоянного тока исследования проводились в основном по двум направлениям – динамика системы электропривода [2, 3, 4] и динамика шахтного электровозосостава [5]. В комплексе с учетом взаимовлияния между двумя системами исследования практически не проводились, за исключением Элиса, и то применительно к электровозу с единственным коксотушильным вагоном [6].

**Постановка задачи.** Как известно, операции передвижения вагонеток под разгрузку выполняются машинистом электровоза по командам специального рабочего снаружи. Учитывая возможные трудности коммуникации между двумя работниками, их произвольно случайное психофизическое состояние, а самое главное – отсутствие плавности управления двигателями электровоза, становится ясным, что операции перестановки под разгрузку и погрузку иногда довольно часто выполняются не оптимально – с ошибками позиционирования, или потерей времени на точное позиционирование. Ситуацию осложняет то обстоятельство, что в сцепных устройствах электровозосоставов имеются значительные люфты. Если с помощью автоматизации сократить время выполнения этих работ, то можно интенсифицировать работу шахтного транспорта в целом, тем самым повышая экономичность его использования.

**Изложение материала и результаты.** В расчетах использовались модели электровозосостава – электровоза и вагонеток, учитывающих упругие и вязкие свойства как электровоза и вагонеток, так и аппарата сочленения.

Процессы, протекающие в механической системе шахтного электровозосостава, описываются системой дифференциальных уравнений.

Дифференциальное уравнение движения электровоза

$$m_{EL} \times \frac{dV_{EL}}{dt} = F_{ДВ} - F_{СТ1} - F_{Y1} - F_{ТП1}. \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение движения  $n$ -й вагонетки

$$m_{BN} \times \frac{dV_{BN}}{dt} = F_{Y(N+1)} - F_{СТN} - F_{YN} - F_{ТПN}. \quad (2)$$

Выражение для моделирования упругого усилия с учетом зазора в  $n$ -м сцепном устройстве

$$F_{Y1...YN} = \begin{cases} C \left( \Delta L_N - \frac{\delta_N}{2} \right); \Delta L_N > \delta_N; \\ 0; & |\Delta L_N| \leq \delta_N; \\ C \left( \Delta L_N + \frac{\delta_N}{2} \right); \Delta L_N < -\delta_N. \end{cases} + F_{BT1...N}. \quad (3)$$

Выражение, моделирующее силу вязкого трения в  $n$ -м сцепном устройстве

$$F_{BTN} = \beta(V_{BN} - V_{B(N-1)}). \quad (4)$$

Выражение, моделирующее силу сопротивления трогания  $n$ -й вагонетки, с дальнейшим спаданием по гиперболическому закону

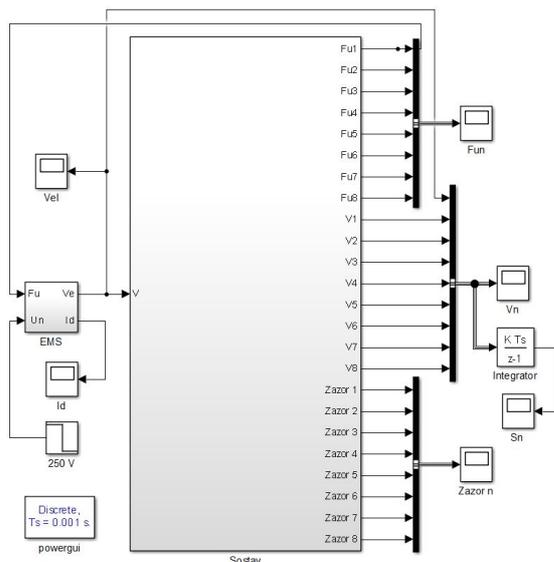
$$F_{ТПN} = F_{MAX}(V_{BN} + 1)^{-1}. \quad (5)$$

Дифференциальное уравнение для расчета величины деформации для  $n$ -го сцепного устройства

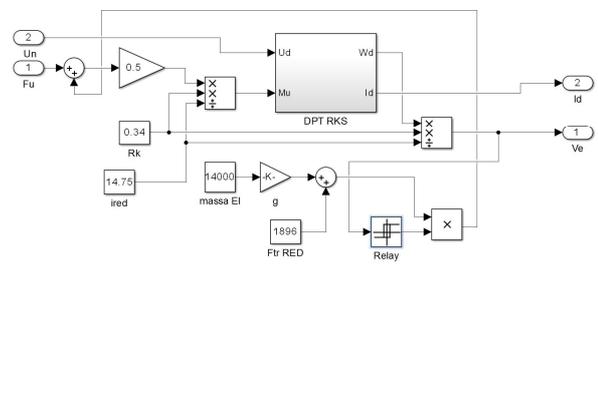
$$\frac{d\Delta L_N}{dt} = V_{BN} - V_{B(N-1)}, \quad (6)$$

где  $m_{EL}$ ,  $m_{BN}$  – соответственно массы электровоза (с учетом приведенных масс электродвигателей) и вагонеток;  $C$  – коэффициент жесткости сцепки;  $V_{EL}$ ,  $V_{NB}$  – линейные скорости электровоза и вагонеток;  $F_{ДВ}$  – движущее усилие, приложенное к массе  $m_{EL}$ ;  $F_{СТN}$  – сила статического сопротивления, действующего на массу  $m_{EL}$  и  $m_{BN}$ .

Ниже (рис. 1) приведена общая модель исследуемой системы из электровоза и восьми вагонеток. На рис. 2 приведена структура модели электромеханической системы электровоза, в которой учтена кинематика передачи мощности от двигателей электровоза до вагонеток.



**Рис. 1.** Модель для исследования процессов перемещения и позиционирования шахтного электровозосостава из 8 вагонеток



**Рис. 2.** Модель подсистемы EMS (электромеханическая система электровоза)

На рис. 3 приведена структура модели «релейно-контакторная система управления – двигатель постоянного тока», а на рис. 4 – структура для моделирования переключений релейно-контакторной системы электровоза.

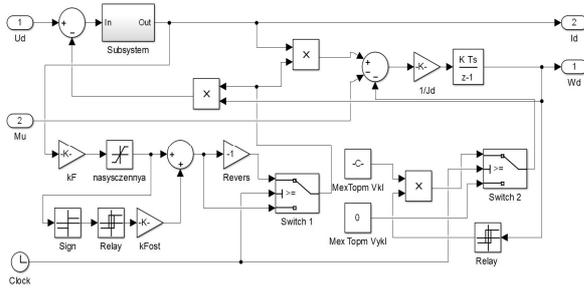


Рис. 3. Модель подсистемы DPT RKS

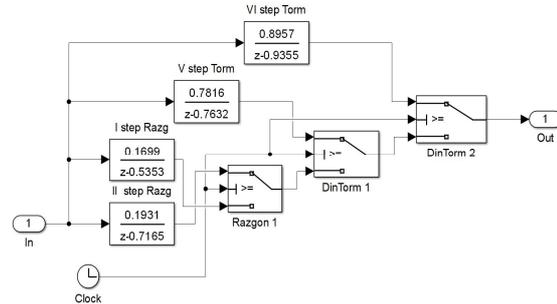


Рис. 4. Модель подсистемы Subsystem

Последние модели были построены на основании штатной принципиальной схемы системы привода «релейно-контакторная система управления – двигатель постоянного тока» рис. 5, а также диаграммы переключения контактов командоконтроллера табл. 1.

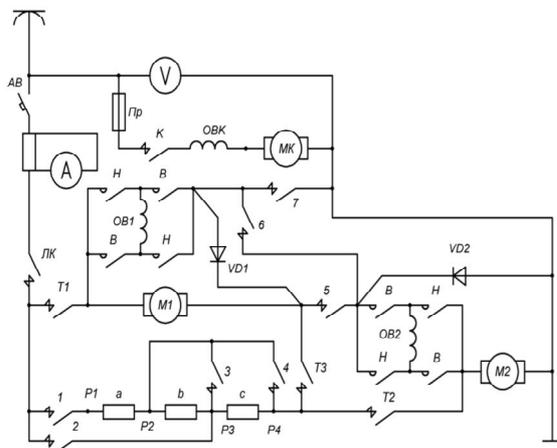


Рис. 5. Принципиальная силовая схема РКС-ДПТ

Таблица 1

Диаграмма переключений контактов командоконтроллера

Контакты	Режим работы																	
	тормозной					двигательный												
	VI	V	IV	III	II	I	0	1	2	3	4	5	X1	X2	X3	6	7	8
T2	X	X	X	X	X	X												
T1	X	X	X	X	X	X												
1	X	X		X	X	X	X	X	X	X								
ЛК								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3				X	X			X	X	X	X							X
4	X	X	X							X	X							X
T3								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5	X	X	X	X	X	X										X	X	X
6								X	X	X	X	X	X	X	X			
7	X	X	X	X	X	X									X	X	X	X
8								X										

На рис.4 реализованы только две первые пусковые и две последние тормозные ступени командоконтроллера. Эти ступени выбраны не произвольным образом, а экспериментально на модели, исходя из решения задачи передвижения вагонеток на небольшой скорости под разгрузку. В реальных условиях шахты с помощью хронометрирования на месте разгрузки было установлено, что перемещение 2-х вагонеток (под двухместный опрокидыватель) идет приблизительно 20 секунд. Так как длина вагонеток типа ВГ-4,5 по буферам 3950 мм, то обе вагонетки перемещаются под разгрузку на расстояние 7,9 м при средней скорости  $7,9/20 = 0,395$  м/с.

На первой разгонной ступени до 2,5-й секунды идет трогание электровозосостава, после чего оператор переводит рукоять командоконтроллера на вторую позицию, и электровоз разгоняется дальше. Далее на 16,4 секунде оператором осуществляется переключение с разгонного режима на режим динамического торможения (с реверсированием обмотки возбуждения), с дальнейшим последовательным переключением 2-х тормозных позиций командоконтроллера. При этом выключается питание двигателей (рис. 6), и они переводятся на режим динамического торможения. Ток двигателей электровоза при осуществлении всех этих переключений показан на рис. 7.

Как видно, последняя тормозная ступень командоконтроллера вызывает наибольший тормозной ток, что связано с практически коротким замыканием якорных цепей (полностью выводятся тормозные резисторы) на малой скорости. Впрочем, пиковое значение тока на этой скорости не превышает номинального значения 204 А для двигателей типа ДТН-45.

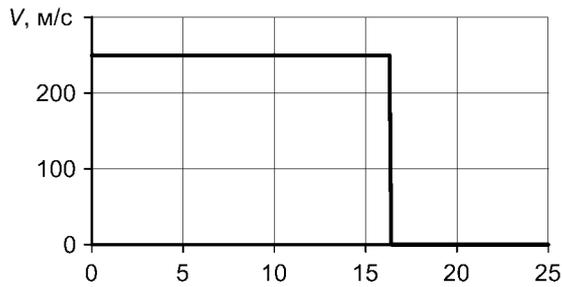


Рис. 6. График напряжения питания

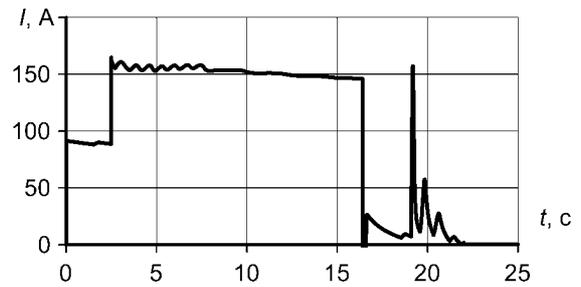


Рис. 7. График тока тяговых двигателей электровоза

Данный алгоритм управления (который осуществляется машинистом электровоза вручную, исходя из его профессионального опыта) приводит к перемещению всех вагонеток электровозосостава на 7,9 м, как это показано на рис. 8.

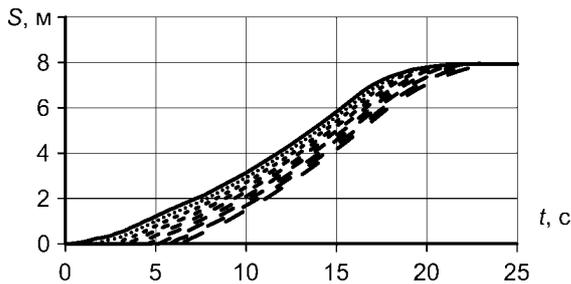


Рис. 8. Графики перемещений электровоза и восьми вагонеток состава

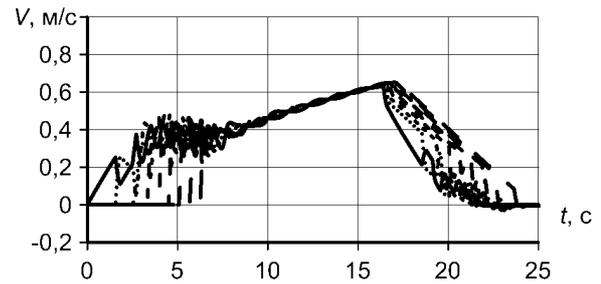


Рис. 9. Графики скорости электровоза и восьми вагонеток состава

Из рис. 9 хорошо видны затухающие колебания скорости вагонеток около значения текущей скорости электровоза, которая для наглядности приведена на отдельном рис. 10. При торможении каждая из этих вагонеток (рис. 11) перед полным остановом проходит какой-то путь на выбеге, прежде чем ударится о переднее сцепное устройство и остановится. Путь (и время) выбега нарастает по величине, от головы электровозосостава к его концу.

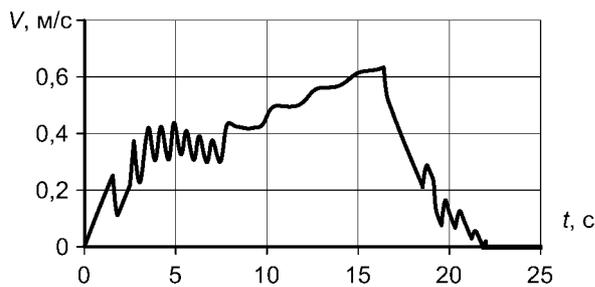


Рис. 10. График скорости электровоза

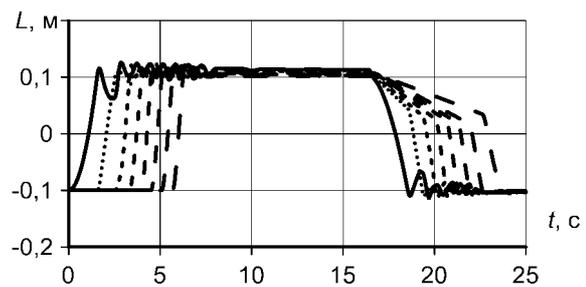


Рис. 11. Графики зазоров в сцепных устройствах

Из графика упругих моментов на сцепном устройстве электровоза (рис. 12) хорошо видны положительные по знаку удары, вызванные рывками вагонеток при трогании, «Нулевые» участки на графике означают, что сцепное устройство в промежуточном положении, то есть величина зазора в сцепном устройстве находится в диапазоне от -0,1 до + 0,1 м (если считать начальным среднее положение сцепного устройства), что хорошо иллюстрируется на графиках зазоров в сцепных устройствах (рис. 11).

Отрицательные удары на графиках рис. 12 иллюстрируют удары в сцепном устройстве электровоза в моменты, когда вагонетки при торможении догоняют друг друга, и передают последовательно через себя импульс движения электровозу.

На рис. 13 видно, что при практически установившемся (равноускоренном, начиная с 7-й и заканчивая 17-й секундами) движении статические упругие усилия в сцепных устройствах

нарастают от хвоста электровозосостава до его головы, что вполне соответствует распределению нагрузок по сцепным устройствам. В заключение можно констатировать, что разброс ошибок позиционирования вагонеток (судя по рис. 9 или 11) относительно друг друга не превышает нескольких сантиметров.

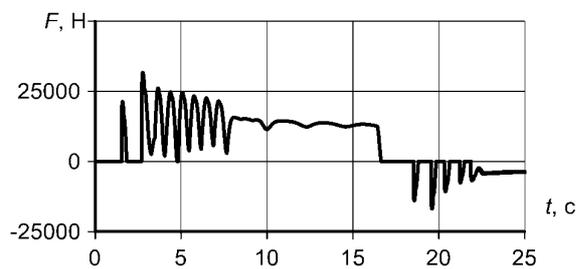


Рис. 12. Графики упругого усилия на сцепном устройстве электровоза

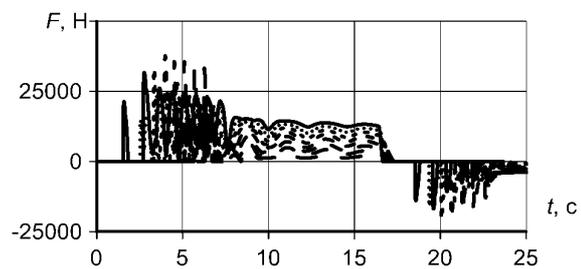


Рис. 13. Графики упругих усилий в сцепных устройствах электровозосостава

Как видим, тяговый электропривод с релейно-контакторной системой управления позволяет получить удовлетворительные результаты при управлении опытным оператором электровоза. Однако по графикам рис. 6–13 не очевидны направления дальнейшей автоматизации управления релейно-контакторной системы управления тяговым электроприводом. При произвольно разной загрузке вагонеток, очевидно, электровозосостав трогается за разное время, потому что нет стабилизации разгонной скорости электровоза (см. рис. 10). Остается открытым вопрос момента времени перехода с разгонного на динамический тормозной режим. Оператор этот момент определяет на основе своего личного опыта, и очевидно, что он может допускать ошибки в оценке этого момента. Далее, переключения между двумя тормозными ступенями тоже могут производиться в произвольные моменты времени.

#### Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Простую жестко детерминированную автоматизированную систему управления точным перемещением вагонеток построить практически невозможно на базе электровоза по системе электропривода релейно–контакторной система управления – двигатель постоянного тока, потому что исходное состояние системы электровозосостава может быть произвольным, и зависит от многих факторов.

2. В качестве инструментария для решения задачи автоматизации управления точным позиционированием при столь неопределенных условиях можно было бы использовать следующие подходы: теорию планирования экспериментов, обучение нейронных сетей, а также идентификацию системы передаточной функцией, что позволило бы в дальнейшем осуществлять предсказуемое управление.

3. Учитывая устарелость системы тягового электропривода релейно–контакторная система управления – двигатель постоянного тока, и отсутствие перспектив по значительному повышению эффективности использования этой системы средствами автоматизации, следует окончательно отказаться от указанной системы привода, и перейти к модернизации путем замены на более современные и управляемые системы тяговым электроприводом.

#### Список литературы

1. Синчук О. Н. О варианте энергоэффективной структуры управления тяговым электромеханическим комплексом двухосных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, А.Ю. Давыдов, С.Н. Якимец, Н.И. Лесной, Е.И. Скапа // *Електромеханічні енергозберігаючі системи*. Кременчук, КНУ 2010. – Вип. 3/2010 (11). – С.27 – 29.
2. Волотковский С. А. Рудничная электровозная тяга / Волотковский С.А. – Москва: Недра, 1981. – 389 с.
3. Клепиков В. Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением : монография / В. Б. Клепиков. – Харьков : Підручник НТУ «ХПІ», 2014. – 408 с.
4. Шахтарь П. С. Динамические процессы в рудничных локомотивах и методики расчета параметров механической части // *Диссертационная работа на соискание ученой степени доктора технических наук*. Министерство угольной промышленности УССР. Донецкий научно-исследовательский угольный институт ДонУГИ. – Донецк, 1976 г. – 354 с.
5. Браташ В. А. Научные основы проектирования, создание унифицированного ряда тяговых агрегатов и разработка перспективных типов подвижного состава для железнодорожного транспорта открытых горных разработок // *Диссертационная работа на соискание ученой степени доктора технических наук*. – Днепропетровск, 1992.
6. Еллис С. В. Исследование динамики комплекса коксотушильного электровоза. Диссертационная работа на

соискание ученой степени кандидата технических наук. – Харьков, 1971. – 198 с.

10. **Герман-Галкин С. Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Матлаб 6.0: Учебное пособие. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320 с.

11. **Померанцев А.** Матричные операции в Excel. 2010. Режим доступа <http://rscs.chemometrics.ru/Tutorials/excel.htm>

12. Data Import and Export Режим доступа <https://www.mathworks.com/help/matlab/data-import-and-export.html>

Рукопись поступила в редакцию 10.05.2018

УДК 622.271

Ю.С. МЕЦ, А.Ю. АНТОНОВ, доктора техн. наук, профессора  
Криворожский национальный университет

## УКРАИНЕ – ЕВРОПЕЙСКИЕ ДОРОГИ

**Целью** настоящего исследования является выяснение особенностей асфальтобетонных покрытий современных автотрасс, устойчивость насыпных оснований, взлетно-посадочных полос аэродромов. Поскольку в перспективе поставлена задача создания в нашей стране условий, материалов и технологии таких сооружений, необходимо уточнить возможности сырьевой базы, учесть требования промышленности к строительным материалам и их физико-механическим характеристикам, регламентируемым соответствующими стандартами.

**Методы исследований.** Для достижения сформулированной цели выбраны направления исследований:

1. Анализ и оценка сырьевой базы Украины для производства строительного сырья необходимой номенклатуры.
2. Возможность использования архейских и протерозойских интрузивных, ультраметаморфических и метаморфических пород Украинского щита – гранитов различного состава, сиенитов, габбро, лабрадоритов, мигматитов, гнейсов, кристаллических сланцев, амфиболитов, кварцитов и песчаников.
3. Оценка технологических свойств строительных щебней по их форме (кубовидности и лещадности).
4. Анализ мировой практики эффективного производства щебня кубовидной формы.

**Научная новизна.** Решение поставленных задач и составляет актуальность данной работы. Асфальтобетонные смеси на кубовидном щебне обладают лучшей уплотняемостью за счет взаимозаклинивания зерен. Щебень же с зернами лещадной формы при уплотнении смеси вследствие слабой механической прочности частично разрушается, образуя свежие поверхности не покрытые битумом. Последние под действием атмосферных факторов (вода, мороз) могут являться первичными очагами разрушения асфальтобетонных покрытий. Повышенное содержание прочного кубовидного щебня обеспечивает высокое сцепление с колесом автомобиля, а увеличенное количество асфальтного вяжущего вещества способствует повышению водо- и морозостойкости.

**Практическая значимость и результаты.** Установлено, что в Украине насчитывается 780 объектов с разведенными запасами, в том числе 422 находятся в эксплуатации. Из них 377 месторождений, которые оценены по категориям А+В +С, имеют запасы 2498036,9 тыс. м<sup>3</sup>

Наибольшее количество запасов сосредоточено в областях: Житомирской -17,7%; Полтавской – 14,53%; Кировоградской - 8,33%; Донецкой – 8,11%; Днепропетровской – 6,05%.

На территории Кировоградской и Днепропетровской областей эксплуатируются 28 и 20 месторождений соответственно. Наибольший объем продукции производится в Днепропетровской, Полтавской, Ровенской, Винницкой, Запорожской областях, которые обеспечивают более 55% потребности в щебне.

**Ключевые слова:** кубовидный щебень, дорожное покрытие, сырьевая база.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-103-173-177

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** В связи со строительством в Украине автомобильных дорог европейского уровня, взлетных полос аэродромов, оснований для скоростных железных дорог и других ответственных сооружений возникла потребность в увеличении объемов выпуска нерудных строительных материалов, особенно щебня из скальных изверженных пород. Это обеспечивает повышенную прочность и долговечность сооружений. Однако, эти породы почти в два раза прочнее и абразивнее, чем породы осадочного происхождения и, поэтому, требуют повышенных затрат энергии при добыче и последующей механической переработке.

В настоящее время потребность в высококачественных материалах имеет тенденцию к росту, особенно в щебне кубовидной формы. Следует отметить значительные возможности Украины в сырьевой базе для получения такого щебня [1-3]. Установлено, что использование щебня кубовидной формы для приготовления асфальтобетонных смесей увеличивает качественные показатели дорожных покрытий в 2,5-3 раза по сравнению со щебнем лещадной формы. Причем, чем выше уровень кубовидности, тем меньше расход вяжущих материалов, цемента и би-