

УДК 004.942; 622.3

## О ВЫБОРЕ АЛГОРИТМА И КРИТЕРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО КОМПЛЕКТА ГОРНЫХ МАШИН В СО- СТАВЕ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Кузнецов И.С.,<sup>1</sup> аспирант 3 года обучения, <sup>2</sup> ассистент кафедры ИиАПС  
Николаев П.И., <sup>1</sup> ведущий инженер, <sup>2</sup> старший преподаватель кафедры ИиАПС

<sup>1</sup> ФИЦ УУХ СО РАН  
<sup>2</sup> КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

Для проведения вскрышных и добычных работ на карьерах применяют мощные экскаваторно-автомобильные комплексы (ЭАК). В составе ЭАК основными элементами выступают экскаваторы и автосамосвалы различных типоразмеров, применяемые для одних и тех же горно-геологических и горнотехнических условий в различных комплектациях. Современный рынок горных машин применительно к ЭАК насчитывает множество моделей автосамосвалов (более 131) и экскаваторов (более 85) [1].

При выборе экскаватора главными параметрами являются: рабочий диапазон физико-механических свойств пород, установленные высоты уступа или развала и их ширина, размер фракции и объем горной массы после проведения буровзрывных работ (БВР) [6].

При выборе грузоподъемности автосамосвалов, закрепляемых за экскаватором с конкретным объемом ковша используют классическое соотношение: для полной загрузки горной массы в автосамосвал достаточно 3-6 ковшей [7]. Для расчета количества автосамосвалов используют аналитические формулы [8], либо определяют исходя из максимальной теоретической производительности экскаватора.

Как правило, при аналитических расчетах не учитывается вероятностная природа технологических процессов, простой машин и динамика ведения горных работ. Все это приводит к значительному расхождению расчетных данных и показателей работы реального угольного разреза [1]. Поэтому для учета динамики и вероятностной природы ведения горных работ применяется метод имитационного моделирования [21].

Ввиду множества существующих моделей горных машин, полный перебор всех возможных их комбинаций, подходящих под выбранные физико-механические, горно-геологические и горнотехнические условия, требует значительных затрат вычислительных ресурсов. Например, на расчет каждой имитационной модели в зависимости от ее сложности и периода моделирования приходится приблизительно 1-3 мин. Полный перебор всех комплектов моделей экскаватора и автосамосвалов состоит минимум из сотен тысяч вариаций и займёт не менее 35 суток.

Поэтому важно выбрать алгоритм, который позволил бы исключить полный перебор всех вариантов, но при этом обеспечил бы приемлемую точность полученных результатов.

В горном деле для оптимизации с множеством вариантов успешно применяются эвристические алгоритмы [2-4]. Данные алгоритмы позволяют найти оптимальные или субоптимальные параметры систем за кратчайшее время с высокой точностью и не требуют аналитического описания целевой функции. Одним из таких алгоритмов является генетический [5], который выбран для проведения оптимизации параметров ЭАК.

Как правило, авторы в качестве выходных показателей эффективности работы ЭАК оптимизировали: производительность  $Q$  [м<sup>3</sup>/сут.] и удельные затраты на производство угля/вскрыши  $C$  [руб./м<sup>3</sup>] [9,10]. При выборе комплекта горных машин ЭАК с одновременной оптимизацией этих параметров, то возникает парадокс, т.к. одновременно один параметр максимизируют, а второй минимизируют. Ввиду того, что одновременно оптимизируется более одного параметра, возникает задача многокритериальной оптимизации. При решения такого рода задачи необходимо свести многокритериальную оптимизацию к однокритериальной. Для этого используются различные методы, пример представлен в таблице 1 [11-14,16-20].

Таблица 1

Пример обзора методов сведения многокритериальной оптимизации к однокритериальной

Метод	Суть метода	Достоинства	Недостатки
Метод главного критерия	Суть заключается в выборе доминирующего критерия из рассматриваемых, а остальные используются в качестве ограничений.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Простота при проведении расчетов и интерпретации результатов;</li> <li>2. Малая затрата временных и машинных ресурсов;</li> <li>3. Позволяет найти единственное оптимальное решение.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Не всегда можно определить главный критерий;</li> <li>2. Возможна потеря эффекта влияния совокупности нескольких второстепенных критериев;</li> <li>3. Необходимо обосновать ограничения;</li> <li>4. Чрезмерное упрощение задачи;</li> <li>5. Если выбранный критерий действительно важнее остальных, то нет гарантии, что сумма остальных критериев не будет важнее.</li> </ol>

<p>Метод уступок</p>	<p>Суть заключается в том, что локальные критерии предварительно ранжируются по важности. Затем ищется наилучшее решение по наиболее важному критерию.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Простота в реализации;</li> <li>2. Возможность контролировать ценой какой уступки в одном критерии приобретает выигрыш в другом частом критерии.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. По причине заранее неизвестной взаимосвязи частных критериев, как правило не удаётся заранее назначить величины уступок;</li> <li>2. Решение, полученное данным методом может оказаться не оптимальным по Парето;</li> <li>3. Субъективность метода выбора уступок;</li> <li>4. Учитываются только попарные связи критериев.</li> </ol>
<p>Метод свертки</p>	<p>Суть заключается в объединении нескольких частных критериев в единый «супер» критерий.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Часто применяются для решения практических задач;</li> <li>2. Простота в реализации;</li> <li>3. Позволяет найти единственное оптимальное решение.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сложно обосновать выбор метода свертки;</li> <li>2. Сложно обосновать значения весовых коэффициентов;</li> <li>3. Возможность компенсации малых значений одних критериев большими значениями других.</li> </ol>
<p>Метод лексикографической оптимизации</p>	<p>Суть метода аналогична методу уступок.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Не требуется однородности критериев;</li> <li>2. Позволяет найти единственное оптимальное решение.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. При использовании как правило принимается во внимание только первый – важнейший критерий;</li> <li>2. Возникновение содержательных трудностей в установлении полной последовательности по их важности.</li> </ol>

В результате проведенного обзора, установлено, что для решения данной задачи наиболее эффективным является метод свертки, так как:

1. Наиболее часто применяются для решения практических задач;
2. Просты в реализации;

3. Позволяет найти единственное решение;

При использовании выбранного метода, важно выбрать способ свертки оптимизации выходных показателей работы ЭАК, объединяющего производительность и удельную стоимость на производство 1 угля/вскрыши. Для обоснования комплексного критерия можно применить аддитивную или мультипликативную свертку как наиболее часто применяемые на практике [11-14].

Выбор между мультипликативной и аддитивной сверткой сводится к определению лицом, принимающим решение, важности учета абсолютных значений оптимизируемых параметров.

### **1. Аддитивная свертка**

При аддитивной свертке критерий оптимизации  $F_A$  требует минимизации или максимизации для всех составляющих его параметров. Один из параметров – производительность – требует максимизации, а второй – удельные затраты – минимизации. Поэтому показатель производительности, требующий максимизации, необходимо адаптировать для минимизации. Так как он имеет размерность  $[м^3/сут.]$ , обратной ему величиной будет удельное время на вскрышу/добычу породы/угля  $T$   $[сут./м^3]$ . Ввиду достаточно малого значения параметра  $T$  с практически одинаковыми значениями для данной размерности, примем размерность параметра  $T$   $[мин./м^3]$ . Оптимизируемые показатели эффективности имеют разные размерности, поэтому для сведения их в единый критерий необходимо нормировать все показатели для избавления от разных размерностей. При нормировании проводят деление значения каждого критерия на некоторое значение – нормирующий параметр. Одним из рекомендуемых методов является нормирование на основе медианы области компромисса, располагающаяся на середине между максимальным и минимальным значениями оптимизируемых параметров [7,9].

Таким образом, комплексный критерий оптимизации с применением аддитивной свертки показателей эффективности ЭАК будет иметь вид:

$$F_A = 2 \sqrt{\frac{T^2}{(T_{\max} + T_{\min})^2} + \frac{C^2}{(C_{\max} + C_{\min})^2}} \rightarrow \min \quad (1)$$

где:  $T_{\max}, T_{\min}$  - максимальное и минимальное значения удельного времени на вскрышу/добычу породы/угля,  $[мин./м^3]$ ;

$C_{\max}, C_{\min}$  - максимальное и минимальное значения удельных затрат на вскрышу/добычу породы/угля,  $[руб./м^3]$ .

### **2. Мультипликативная свертка**

При мультипликативной свертке нет необходимости нормировать значения отдельных значений критериев, так как при его применении используются абсолютные значения критериев [7].

Если необходимо один показатель максимизировать, а другой минимизировать, то применяется функция оптимизации мультипликативной свертки в агрегированном виде. В этом случае значение критерия  $F_M$  будет максимизи-

роваться [7]. Таким образом, комплексный критерий оптимизации с применением мультипликативной свёртки показателей эффективности ЭАК будет иметь вид:

$$F = \frac{Q}{C} \rightarrow \max \quad (2)$$

Для выбора типа свёртки показателей эффективности ведения вскрышных работ на угольном разрезе проверим их работу на решении задачи оптимизации в упрощённом виде:

Пусть ЭАК включает в себя один экскаватор, за которым закреплено 5 автосамосвалов грузоподъемности  $g$ . Высота развала 10 метров, ширина развала 20 метров. Угол падения угольного пласта  $2^\circ$ . После выполнения процесса погрузки автосамосвалы транспортируют породу IV категории в пункт разгрузки «Отвал 1», располагающийся на расстоянии от забоя 2,47 км с последующей разгрузкой и возвращением к закрепленному экскаватору. Тип схемы установки на погрузку примем тупиковую как самую распространённую [15]. Необходимо выбрать рациональный комплект горных машин: экскаватор и закрепленные за ним автосамосвалы определенной грузоподъемности и количества. Всевозможные внеплановые и плановые простои горных машин исключаются. Период моделирования 1 месяц.

Примеры рассматриваемых моделей горных машин:

1. Экскаваторы: ЭКГ-10, Komatsu PC-1250 и Hitachi-EX-1900;
2. Автосамосвалы: БелАЗ-7513 (0...5 шт.), Komatsu-HD-780-7 (0...5 шт.) и БелАЗ-7530 (0...5 шт.).

После проведения имитационных экспериментов для каждого варианта определялись значения критериев  $F_A$  и  $F_M$ .

Фрагмент таблицы результатов имитационных экспериментов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Фрагмент результатов имитационных экспериментов  
 по выбору комплектов горных машин в составе комплекта ЭАК

№	Экс.	БелАЗ - 7513, шт.	БелАЗ - 7530, шт.	Komatsu - HD-780-7, шт.	$Q$ , м <sup>3</sup> /мин	$T$ , мин/м <sup>3</sup>	$C$ , руб./м <sup>3</sup>	$F_A$	$F_M$
1	ЭКГ-10	1	0	0	9025,69	0,16	10,62	1,38	849,85
2		3	1	0	12324,32	0,12	11,14	1,19	1105,86
3		2	2	0	12993,71	0,11	11,19	1,17	1160,51
4		3	1	1	11753,81	0,12	11,41	1,23	1029,72
5		2	2	1	11923,90	0,12	11,51	1,23	1035,50
...		...							
216		5	5	5	10456,30	0,14	14,45	1,48	723,29
1	Komatsu	1	2	1	12613,23	0,11	11,24	1,18	1121,62
2		PC-1250	2	2	1	12029,44	0,12	11,50	1,22

3		3	2	1	11779,28	0,12	11,73	1,25	1003,88	
4		5	4	1	10744,00	0,13	13,04	1,38	823,55	
5		0	5	1	12265,13	0,12	12,01	1,25	1020,61	
...		2	5	1	11589,03	0,12	12,54	1,31	924,04	
216		5	5	5	11042,26	0,13	14,22	1,44	776,53	
1	Hitachi- EX- 1900	3	4	2	11070,09	0,13	12,75	1,35	867,68	
2		4	4	2	10892,82	0,13	13,01	1,37	836,66	
3		5	4	2	10938,33	0,13	13,22	1,38	827,27	
4		0	5	2	10700,16	0,13	12,54	1,35	852,74	
5		1	5	2	11333,62	0,13	12,61	1,32	898,54	
...		...								
216		5	5	5	10712,06	0,13	14,35	1,46	746,48	

Установлено, что обе свертки дали идентичные результаты. Рациональным комплектом горных машин из предоставленных вариантов и для установленных горнотехнических и горно-геологических условий является экскаватор ЭКГ-10 с закрепленными за ним по 1 единице автосамосвалов БелАЗ-7513 и БелАЗ-7530.

В результате анализа механизма работы критериев выявлено, что значения показателей эффективности находятся в от 0,11 до 0,18 мин/м<sup>3</sup>, удельной стоимости – от 10,61 до 14,45 руб./ м<sup>3</sup>, далёком от нулевых значений. С точки зрения вычислений мультипликативный критерий оптимизации не требует дополнительной операции нормирования, поэтому предпочтительно его использование для оптимизации параметров ЭАК.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90031 "Разработка специализированной компьютерной системы имитационного моделирования для исследования параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии".*

### Список литературы:

1. Кузнецов И.С. О многовариантности выбора комплекта горных машин и организации работ в забое при открытой добыче угля / И.С. Кузнецов, В.В. Зиновьев, А.В. Кузнецова // Сборник ежегодной международной научно-практической конференция ИИТМА КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и транспорте - 2020».- С. 207 – 211
2. Николаев П.И. Методы оптимизации в горном деле / Сборник материалов VII Всероссийской, научно-практической конференции молодых учёных с международным участием «Россия Молодая», Кемерово. - 2015.
3. Зиновьев В.В. Новый подход к обоснованию геотехнологий без постоянного присутствия людей в забое / В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов, П.И. Николаев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2017. - №5. - С. 37 - 43.

4. Курейчик В.В. Концепция эволюционных вычислений, инспирированных природными системами / В.В. Курейчик, С.И. Родзин // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2009. - №4. - С. 16 - 24
5. Вирсанки Э. В52 Генетические алгоритмы на Python / пер. с англ. А. А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 286 с.
6. Литвин О.И. Обоснование рациональных технологических параметров производства вскрышных работ гидравлическими лопатами на разрезах Кузбасса: автореф. ... канд. тех. наук: 25.00.22 / Литвин Олег Иванович; КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева и ООО «Кузбассразрезуголь-Взрывпром». - Кемерово., 2012. - 22 с.
7. Шамсутдинов М.М. Открытые горные работы: учебное пособие / М.М. Шамсутдинов, Э.В. Лупинин. - Бишкек, 2015. - 182 с.
8. Мартьянов В.Л. Основы открытой добычи. Производственные процессы открытых горных работ: учеб. пособие / В.Л. Мартьянов, Е.В. Курехин; КузГТУ. - Кемерово, 2019. - 144 с.
9. Фурман А.С. Оценка эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов на технологических трассах разрезов Кузбасса: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06. / Фурман Андрей Сергеевич; КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева; науч. рук. Г.Д. Буялич. - Кемерово, 2018. - С. 137
10. Стенин Д.В. Обоснование влияния ресурса несущих систем и степени загрузки на производительность карьерных автосамосвалов: автореф. ... канд. тех. наук: 05.05.06 - Кемерово, 2008. - 19 с.
11. Зак Ю. А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации / Москва: Экономика, 2014. - 455 с.
12. Бродецкий Г. Л. Системный анализ в логистике, выбор в условиях неопределённости. - М: Academia. - 2010. - 336 с.
13. Николаев П. И. Обоснование критерия оптимизации параметров проходческих работ, исключающих постоянное присутствие людей в забоях / Материалы конвента «Кузбасс: образование, наука, инновации». - 2019. - С. 45-48.
14. Белов В.В. Оригинальная свертка двух критериев для задач выбора наилучшего варианта / В.В. Белов, А.К. Лопатин // Современные наукоемкие технологии. - 2019. - №8. - С. 14- 19.
15. Стенин Д.В. Перспективы развития производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика - 2019. - № 6. С. 3-8
16. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация / Штойер Р. : пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1992. – 504с. – (Теория, вычисления и приложения).
17. Корнеенко В.П. Методы оптимизации / Корнеенко В.П. – М.: Высшая школа, 2007. – 664с.
18. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. -64с.

19. Ногин В.Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации / Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. №4. – С. 73 – 82
20. Домашкова Д.В. Методы решения задач многокритериальной оптимизации [Текст]: методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе студентов / Д.В. Домашкова. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. – 49 с.
21. Фу Ф.Г. Имитационное моделирование работы грузовых транспортных терминалов / Ф.Г. Фу, А.Л. Казаков // Вестник ИрГТУ. – 2013. №9. – С. 37 – 42