

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

УДК 622.684: 622.003.13

А.Ю. Захаров, А.Ю. Воронов

АЛГОРИТМ ОПЕРАТИВНОЙ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ КАРЬЕРНОГО АВТОТРАНСПОРТА

В экскаваторно-автомобильных комплексах (ЭАК) карьеров наибольшее внимание уделяется повышению их производительности. От способности диспетчерского алгоритма максимизировать производительность ЭАК в реальном времени во многом зависит и эффективность диспетчерской системы. Как показывает практика, эффективная система диспетчеризации карьерного автотранспорта должна быть мультиуровневой.

Мультиуровневые диспетчерские системы состоят, как правило, из двух основных частей. Первая часть (верхний уровень) представляет собой обычно линейную программную модель (ЛПМ) для определения целевых показателей производительности (выработки) и является основой краткосрочного прогнозирования и планирования работы ЭАК карьера. Во второй части (на нижнем уровне) с использованием математического программирования или эвристических методов строится алгоритм оперативной диспетчеризации для динамического распределения автосамосвалов между экскаваторами в реальном времени на основе оптимального решения, полученного на верхнем уровне. Следовательно, способность диспетчерской системы к максимизации производительности зависит, во-первых, от эффективности принятой программной модели и, во-вторых, от эффективности алгоритма оперативной диспетчеризации. Кроме того, такая система должна обладать гибкостью, т.е. быстро реагировать на такие изменения в работе ЭАК, как выход из строя экскаваторов или самосвалов [1].

Верхний уровень. При решении задачи максимизации производительности ЭАК на верхнем уровне должны быть установлены целевые (плановые) значения выработки для каждого экскаватора, на основании которых, а также транспортной системы карьера, количества и местоположения пунктов складирования горной массы определяются оптимальные грузопотоки между экскаваторами и этими пунктами. Эти оптимальные грузопотоки, полученные в результате решения целевой программной модели, используются в качестве целевых показателей, служащих основанием для выбора «нуждающихся» экскаваторов. «Нуждающиеся» экскаваторы определяются либо по величине накопленной выработки каждого маршрута,

либо по величине отклонения накопленной выработки от плана. Цель – минимизировать отклонение от плана.

Таким образом, на верхнем уровне на основании плана экскавации горной массы, которую необходимо погрузить и вывезти, формируется парк погрузочной техники (одноковшовых экскаваторов) и соответствующий ему парк автосамосвалов. Плановые объемы горной массы, подлежащей экскавации и транспортированию в отвалы, разделяются между погрузочными пунктами, очевидно, по номинальной производительности экскаваторов, размещаемых в этих пунктах. Во избежание возможных скоплений самосвалов решается транспортная задача: зная расстояния от каждого экскаватора до каждого отвала, можно установить – какие объемы горной массы должны быть перевезены от каждого экскаватора на каждый отвал. Основной критерий маршрутизации – минимальный пробег.

Этот план погрузки и вывоза является основанием для выбора критерия диспетчеризации. Главная цель, которой необходимо достичь на нижнем уровне, – выполнение каждым экскаватором своего плана.

На карьерах всегда действует группа экскаваторов различных типоразмеров и (обычно) несколько отвалов. Вначале определяем сменную производительность каждого экскаватора по формуле

$$W_{\vartheta_j} = 3600 \frac{\rho_n \cdot E_{\kappa_j}^{\vartheta} \cdot k_{\text{нк}}}{t_{u_j}^{\vartheta} \cdot k_p} \cdot k_e \cdot k_n \cdot k_{\text{упр}} \cdot T_{cm}, \quad (1)$$

где ρ_n – плотность горной массы в целике, $\text{т}/\text{м}^3$; $E_{\kappa_j}^{\vartheta}$ – геометрический объем ковша экскаватора j -го типоразмера, м^3 ; $t_{u_j}^{\vartheta}$ – продолжительность цикла

экскаватора j -го типоразмера, с; $k_{\text{нк}}$ – коэффициент наполнения ковша; k_p – коэффициент разрыхления горной массы; k_e – коэффициент использования экскаватора по времени (принимается в пределах 0,8...0,9, или определяется по фактическим данным предприятия); k_n – коэффициент потерь экскавируемой породы ($k_n = 0,98...0,99$ [2]); $k_{\text{упр}}$ –

Таблица 1. Состав и характеристика действующего экскаваторного парка разреза «Кедровский»

Параметры	Участок №1		Участок №3			Участок №4		
	ЭКГ-10 №202	ЭКГ-15 №41	ЭКГ-12,5 №12	ЭКГ-15 №42	Р-994 №18061	Р&Н-2800 №152	ЭКГ-10 №285	ЭШ-10/70 №259
Вместимость ковша E_k^3 , м ³	10	15	12,5	15	13,5	33	10	10
Время цикла t_{yj}^3 , с	26	26	28	30	25	32	26	52,5
Количество, ед.	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 2. Состав и характеристика действующего парка автосамосвалов разреза «Кедровский»

Параметры	БелАЗ-75131	БелАЗ-75306
Грузоподъемность q , т	130	220
Масса самосвала q_t , т	100	146
Номинальная вместимость кузова V_k^c , м ³	45,45	91,6
Вместимость кузова с «шапкой» 2:1, м ³	71,17	129,8
Максимальная скорость движения v_{max} , км/ч	42	42
Количество, ед.	8	21

Таблица 3. Расстояния транспортирования l_{ik} для условий разреза «Кедровский», км

Отвалы	Экскаваторы							
	ЭКГ-12,5 №12	Р&Н-2800 №152	Р-994 №18061	ЭКГ-10 №202	ЭШ-10/50 №259	ЭКГ-10 №285	ЭКГ-15 №41	ЭКГ-15 №42
Внутренний (участок №3)	2,55	2,01	2,05	2,45	9,55	8,55	8,45	2,95
Восточный внутренний (участок №4)	11,85	12,05	11,15	10,05	3,61	2,62	12,35	13,15
Северный (участок №1)	8,55	8,65	2,69	6,65	9,95	9,65	2,57	9,75
Центральный (участок №3)	6,15	6,35	5,45	5,95	13,05	12,05	11,95	3,37
Южный (участок №3)	1,83	2,11	2,01	2,15	9,15	8,15	8,05	3,86
Южный (участок №1)	4,45	4,65	3,75	1,31	9,75	9,45	8,75	5,75

коэффициент управления ($k_{upr} = 0,92 \dots 0,98$ [2]); T_{sm} – продолжительность рабочей смены, ч.

Тогда выработка всех экскаваторов j -го типоразмера будет равна (t):

$$Q_j = W_{ej} \cdot n_j, \quad (2)$$

где n_j – количество экскаваторов j -го типоразмера в составе действующего парка.

Общая выработка всего парка экскаваторов определится по формуле

$$\sum_j Q_j = 3600 \frac{\rho_n \cdot E_{kj}^3 \cdot k_{nk}}{t_{uj}^3 \cdot k_p} k_s k_n k_{upr} T_{sm} n_j \quad (3)$$

и будет составлять сменный план погрузки и пе-

ревозок для карьера.

Если в карьере существует одновременно несколько (k) отвалов, вместимость их ограничивается технологическими причинами, а значит, должна задаваться заранее. Следовательно, в течение смены на все действующие отвалы должно быть вывезено

$$\sum_{k=1}^k Q_k = \sum_j Q_j \quad (4)$$

тонн горной массы.

Если обозначить через q_{ik} количество породы, вывозимое от экскаватора i на отвал k , тогда линейная программная модель будет иметь вид:

$$\sum_{i=1}^{mn} \sum_{k=1}^k l_{ik} \cdot q_{ik} \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{mn} q_{ik} = Q_k, k = 1, 2, \dots, k, \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^k q_{ik} = \sum_j Q_j, i = 1, 2, \dots, n_i, \quad (7)$$

$$q_{ik} \geq 0, i = 1, 2, \dots, m, n_i, k = 1, 2, \dots, k, \quad (8)$$

где m – число типоразмеров экскаваторов.

В целевой функции (5) l_{ik} – расстояние от i -го экскаватора до k -го отвала и обратно, выступающее в качестве транспортных издержек.

Линейная программная модель (5) проверялась применительно к действующему разрезу «Кедровский», являющемуся филиалом Угольной компании «Кузбассразрезуголь». Действующие на данном предприятии парки экскаваторов и самосвалов, а также их характеристики приведены в табл. 1. и 2; расстояния транспортирования l_{ik} – в табл. 3. Техника, работавшая на погрузке и перевозке угля, не рассматривалась.

Согласно схеме автомобильных дорог разреза «Кедровский» (по состоянию на 03.08.2011) горные работы с использованием автотранспорта велись на участках №1, №3 и №4.

На участке №3 работало 4 экскаватора (ЭКГ-12,5 №12, Р&Н-2800 №152, R-994 №18061 и ЭКГ-15 №42), от которых вскрыша вывозилась на 3 отвала: «Центральный», «Южный» и «Внутренний». Во избежание заторов грузопотоки должны быть рассредоточены таким образом, чтобы на каждый из указанных отвалов вывозилось равное количество породы.

На участке №1 работал 1 экскаватор ЭКГ-15 №41, который находится ближе к отвалу «Северный» данного участка, и 1 экскаватор ЭКГ-10 №202, который расположен ближе к отвалу «Южный» участка №1. Отсюда был сделан вывод, что для этого участка решать транспортную задачу

для определения оптимальных маршрутов нет необходимости, потому что они очевидны.

Похожая ситуация на участке №4: работали 2 экскаватора (ЭКГ-10 №285 и ЭШ-10/70 №259), от которых горная масса может вывозиться на близлежащий «Восточный внутренний» отвал.

Следовательно, оптимизационную задачу по установлению оптимальных маршрутов нужно решать только для участка №3. Сменная выработка для каждого экскаватора определялась по формуле (1), транспортная задача решалась по линейной программной модели (5).

Оптимальный план погрузки и вывоза горной массы приведен в табл. 4.

Ввиду неоднородности парков экскаваторов и самосвалов организация перевозок по открытому циклу может не принести ожидаемой выгоды. Поэтому имеет смысл применить комбинированный цикл, при котором формируются группы диспетчеризации (ГД) из конкретных экскаваторов и самосвалов, которые будут работать вместе. Внутри этих групп распределение машин осуществляется по открытому циклу. ГД формируются исходя из соотношений размеров кузовов самосвалов и ковшей экскаваторов.

Согласно методике формирования ГД, на первом этапе определяется суммарная вместимость всех ковшей всех действующих экскаваторов

$$\sum_k E_k^3 = \sum_i^a E_{kj}^3 \cdot n_j, \quad (9)$$

где a – количество действующих участков карьера, на котором применяется автотранспорт; E_{kj}^3 – вместимость ковша экскаватора j -го типоразмера, м^3 ; n_j – количество работающих экскаваторов j -го типоразмера.

Затем рассчитывается общая вместимость кузовов всех работающих самосвалов:

$$\sum_i V_k^c = \sum_i V_{ki}^c \cdot n_i, \quad (10)$$

Таблица 4. Оптимальный план перевозок, тыс. т

Отвалы	Экскаваторы							Сумма, тыс. т	
	Участок №1		Участок №3			Участок №4			
	ЭКГ-10 №202	ЭКГ-15 №41	ЭКГ-12,5 №12	ЭКГ-15 №42	R-994 №18061	Р&Н-2800 №152	ЭКГ-10 №285	ЭШ-10/70 №259	
Северный, №1		20,02							20,02
Южный, №1	15,81								15,81
Центральный, №3				22,02	12,33				34,35
Южный, №3			16,44		9,87	8,04			34,35
Внутренний, №3						34,35			34,35
Восточный внутренний, №4							15,81	7,3	23,11
Сумма, тыс. т	15,81	20,02	16,44	22,02	22,20	42,39	15,81	7,30	163,99

где $V_{k_i}^c$ – вместимость кузова самосвала i -го типоразмера (с «шапкой»), м³; n_i – количество работающих самосвалов i -го типоразмера.

Тогда на 1 м³ геометрической вместимости ковша экскаватора приходится

$$n_{ij} = \frac{\sum_i V_{k_i}^c \cdot n_i}{\sum_l \sum_j E_{k_j}^3 \cdot n_j} \quad (11)$$

вместимости кузова самосвала.

Умножая полученное значение поочередно на вместимость ковша каждого экскаватора, получаем величину, отражающую часть общей вместимости кузовов, приходящуюся на данный экскаватор:

$$Q_{jI} = n_{ij} \cdot E_{k_{jI}}^3, \quad (12)$$

что при вместимости кузова соответствующего самосвала требует

$$N_{c_{ij}} = \frac{Q_{jI}}{V_{k_{ij}}^c} \quad (13)$$

самосвалов i -го типоразмера. Получаемое значение $N_{c_{ij}}$ округляется до целых.

После того как определено, какое количество самосвалов каждого типоразмера приходится на каждый экскаватор, проводится первичное распределение самосвалов между экскаваторами. Экскаваторам большего типоразмера придаются и самосвалы большего типоразмера, учитывая также расположение экскаваторов на участках горных работ.

Таким образом, получаем следующее распределение самосвалов между экскаваторами:

- на один экскаватор Р&Н-2800 – 7 самосвалов БелАЗ-75306;
- на один экскаватор Р-994 – 3 самосвала БелАЗ-75306;
- на один экскаватор ЭКГ-12,5 – 3 самосвала БелАЗ-75306;
- на два экскаватора ЭКГ-15 – 6 самосвалов БелАЗ-75306;
- на два экскаватора ЭКГ-10 и один экскаватор ЭШ-10/70 – 2 самосвала БелАЗ-75306 и 8 самосвалов БелАЗ-75131.

Отсюда следуют группы диспетчеризации: на участке №1 с экскаваторами ЭКГ-10 и ЭКГ-15 должны работать 5 самосвалов БелАЗ-75306; на участке №3 с экскаваторами ЭКГ-12,5, ЭКГ-15, Р-994 и Р&Н-2800 – 16 самосвалов БелАЗ-75306; на участке №4 с экскаваторами ЭКГ-10 и ЭШ-10/70 – 8 самосвалов БелАЗ-75131.

Таким образом, на участках №1 и №3 имеем смешанные парки экскаваторов и однородные парки самосвалов; на участке №4 – однородный

парк экскаваторов и однородный парк самосвалов.

Нижний уровень. Разгрузка самосвала на отвале длится в среднем 40-50 с, поэтому решение задачи по текущему распределению самосвала необходимо начинать в момент начала им разгрузки.

1. *Определение текущего статуса самосвала.* При принятии решения нас интересуют только порожние самосвалы, поэтому определение статуса будем проводить по текущему весу, снимаемому действующей системой диспетчеризации. Все самосвалы, имеющие положительное значение текущего веса (плюс-минус точность), временно отбрасываются.

Кроме того, нужно знать координаты каждого из работающих в данной подсистеме порожних самосвалов (данные берутся также из диспетчерской системы).

2. *Идентификация маршрута.*

3. *Идентификация направления движения (с задачей движения).*

4. *Расчет ожидаемого времени движения до каждого экскаватора:*

$$t_{ocm_j} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{v_i}, \quad (14)$$

где j – номер экскаватора в данной подсистеме; l_i – длина i -го отрезка маршрута; v_i – скорость самосвала на i -м отрезке маршрута.

Скорость v_i для первичного запуска программы будет вычисляться теоретически, с помощью динамической характеристики, а затем – из «истории» движения. Время t_{ocm_j} , таким образом, будет накапливаться.

5. *Расчет ожидаемого времени погрузки.* При первичном запуске вычисляется теоретически, через число ковшей, затем – из «истории».

6. *Вычисление критерия:*

$$J : \arg \min_{j \in A_i} (P_{ij} \cdot T_j), \quad (15)$$

где J – номер экскаватора, к которому нужно отправить самосвал; A_i – множество экскаваторов, находящихся в данной группе диспетчеризации; T_j – ожидаемое время окончания последней погрузки j -го экскаватора (т.е. время, через которое он должен освободиться, включая самосвалы, уже стоящие у него под погрузкой и находящиеся на пути к нему); P_{ij} – «значимость» самосвала j -го типа для экскаватора i -го типа.

7. *Повтор цикла для всех порожних самосвалов в подсистеме.*

8. *Сравнение значений критерии и принятие решения.*

9. *Передача информации распределляемому самосвалу.*

Итак, на нижнем уровне применяется оптимальный алгоритм распределения автосамосвалов на основе выбранного критерия для достижения целевых установок верхнего уровня с наименьшими затратами. Если рассматривать транспорт-

ные процессы ОГР, то такими затратами являются простои – как экскаваторов, так и самосвалов. Простой оборудования в итоге выливаются в значительные финансовые издержки, поэтому их (простои) необходимо свести к минимуму.

В качестве критерия эффективности разработанного алгоритма можно использовать

$$C_{\vartheta} \cdot t_{np}^{\vartheta} + C_c \cdot t_{np}^c \rightarrow \min, \quad (16)$$

где t_{np}^{ϑ} и t_{np}^c – ожидаемое суммарное время про-

стоя экскаваторов и самосвалов соответственно, ч; C_{ϑ} и C_c – значимость (или часовая стоимость) простоя экскаваторов и самосвалов соответственно.

Таким образом, использование предложенного алгоритма оперативной диспетчеризации карьерного автотранспорта может обеспечить существенный экономический эффект за счет сокращения простоя мощного дорогостоящего карьерного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alarie S. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines / Alarie S., Gamache M. // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 2002. – V. 16, № 1. – P. 59-76.
2. Открытые горные работы. Справочник. / К. Н. Трубецкой [и др.]. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.

□ Авторы статьи:

Захаров
Александр Юрьевич,
докт. техн. наук, зав. каф.
стационарных и транспортных ма-
шин КузГТУ. Тел. (3842)39-63-88

Воронов
Артем Юрьевич,
ассистент каф. автомо-
бильных перевозок КузГТУ.
Email: v-tn5586@a42.ru

УДК 629.488.2/33

В.А. Аметов, М.Н. Брильков, Т.Е. Алушкин

МОДЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНОЙ ТОПЛИВОПОДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Введение. Топливная экономичность и надежность автотракторной техники, а также мощностные и экологические характеристики во многом зависят от настройки топливоподающей аппаратуры (ТА).

Согласно данным [1] до 40% отказов всех двигателей приходится на ТА. Статистика отказов ТА, выполненная в работе [2] на примере насоса модели УТН-5, показала, что более половины отказов приходиться на прецизионные узлы топливного насоса высокого давления (ТНВД), что делает их «критическими по надежности» (рис. 1).

При эксплуатации автотракторной техники в отрыве от производственно-технической базы (ПТБ) достаточно остро стоит вопрос проведения технического обслуживания и ремонта ТА дизелей, поскольку без специального оборудования произвести их качественное обслуживание, настройку и ремонт не представляется возможным. Вместе с тем, использование ТА с настройками, не соответствующими нормативной документации (НД), приводит к перегревам дизеля, его неустойчивой работе, повышенному нагарообразованию в цилиндрах, увеличению токсичности отработавших газов до 30% [3] и снижению топливной экономичности до 50% [4].

В условиях эксплуатации получение характеристик, соответствующих НД, достигается проведением своевременного технического обслуживания всего оборудования системы питания. Известно [5] что, к составным частям ТА дизелей относят фильтры грубой (ФГО) и тонкой очистки топлива (ФТО), топливокачивающий насос (ТПН), ТНВД вместе с автоматическим регулятором подачи, форсунки.

К основным показателям работы ФТО и ФГО относят герметичность соединений.

К основным показателям работы ТНВД относят:

- величину цикловой подачи на скоростной характеристики насоса q_s , $\text{мм}^3/\text{цикл}$;
- неравномерность цикловой подачи по цилиндрям δ , %;
- угол начала впрыска топлива (геометрический и действительный) φ , град;
- частота вращения ТНВД при которой включается в работу центробежный регулятор (начало действия регулятора) n_p , мин^{-1} ;
- частота вращения ТНВД при которой весь объем топлива уходит на слив (окончание действия регулятора) $n_{\text{полз}}$, мин^{-1} ;
- пусковая подача топлива $q_{\text{ст}}$, $\text{мм}^3/\text{цикл}$;