Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова,
т. ДХХХУШ, 1981 г.

УДК 622.271.656.13

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ КАРЬЕРНОГО АВТОТРАНСПОРТА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИХ ОПТИМИЗАЦИИ

А.А.КУЛЕШОВ

Задачи оптимизации систем карьерного автотранспорта решаются на основе их анализа и синтеза. Анализ заключается в изучении свойств системы и эффективности ее функционирования в зависимости от структуры связей между подсистемами и элементами. Синтез указанных систем состоит в выборе структуры связей, значений параметров системы, исходя из заданных свойств и эффективности ее функционирования.

Анализ и синтез транспортных систем существенно облегчаются при наличии четкой их классификации.

Транспортная система карьера, определяемая с позиций системного анализа как проходящий процесс [3] включает в себя все звенья технологического процесса, формирующего на выходе грузопоток, и те звенья, которые непосредственно не участвуют в создании грузопотока, но способствуют нормальному функционированию отдельных подсистем. Исходя из определения, разработана классификация систем карьерного автотранспорта (схема I).

Направление грузопотока является одним из важнейших признаков транспортной системы карьера, так как определяет эксплуатационный режим транспортных средств: скорость движения, нагрузочные характеристики агрегатов и систем, безопасность работ. На большинстве карьеров Севера применяют системы технологического автотранспорта, которые создают грузопоток, направленный вверх. В то же время на некоторых карьерах (Центральный апатитовый) транспортная система формирует грузопоток, направленный как вниз (рудный), так и вверх (породный). В комбинированных транспортных схемах, в которых используются дробильные или перегрузочные пункты, транспортная система формирует смешанные по направлению грузопотоки.

По технологической структуре на северных карьерах используются в основном монотранспортные системы (Центральный апатитовый рудник, Ковдорский ГОК, карьеры объединения "Якуталмаз"). С углублением горных работ переходят на комбинированные транспортные схемы, в которых системе технологи-

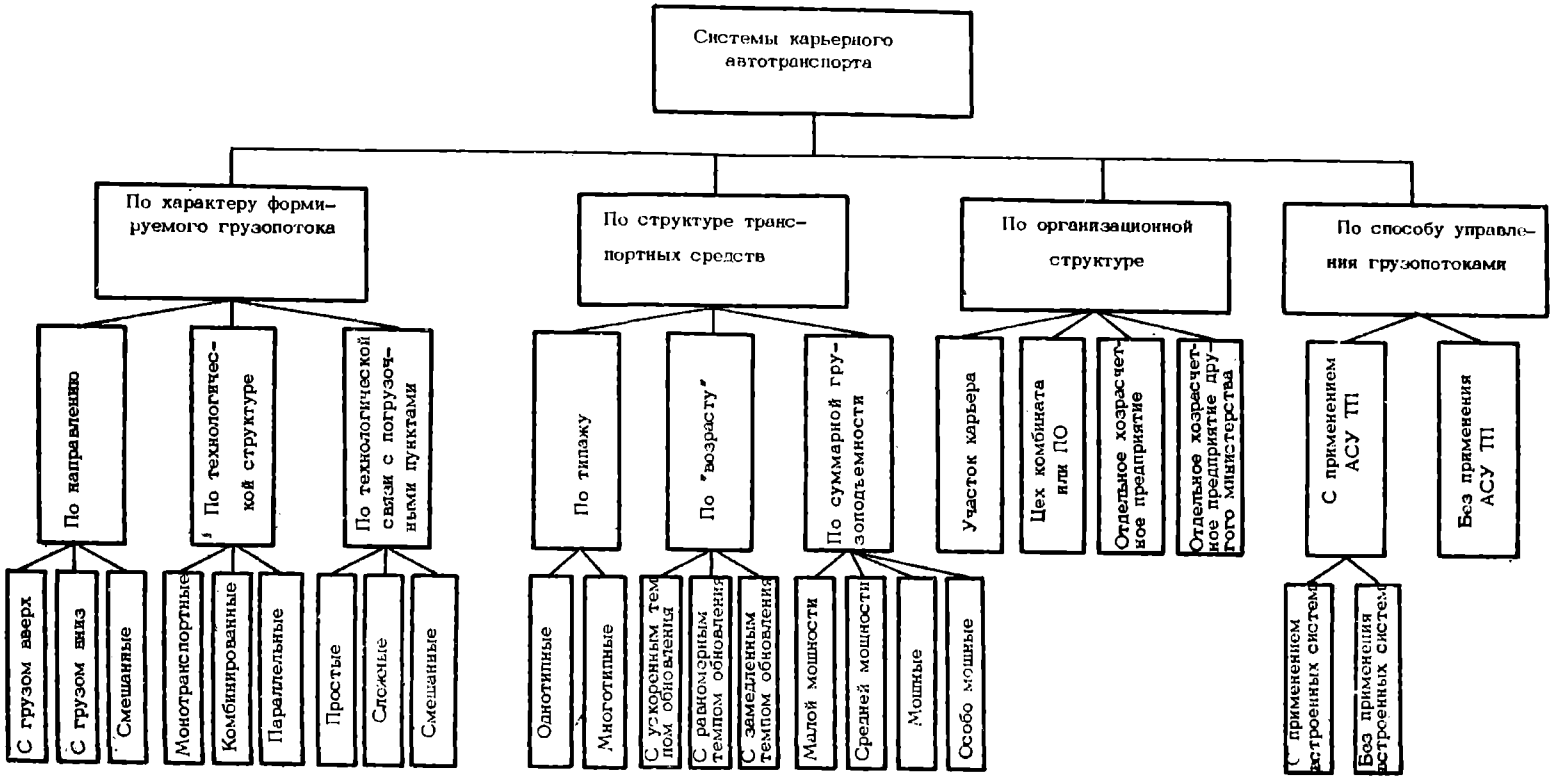


Схема 1. Классификация систем карьерного автотранспорта

ческого автотранспорта отводится роль сборочного звена. Такую систему применяют в настоящее время на карьерах Оленегорского ГОКа, "Медвежий ручей" Норильского ГМК, в ближайшее время начнут использовать на карьере Ковдорского ГОКа.

Параллельные автотранспортные системы – это системы, которые функционируют на карьере обычно параллельно с системами железнодорожного транспорта и создают самостоятельный, параллельный грузопоток, например, на вскрышных работах (Оленегорский карьер на первых этапах развития).

От вида технологической связи транспортных средств с погрузочными пунктами зависит как характер формирования грузопотока, так и его структура. К простым системам относятся такие, в которых транспортные средства жестко закреплены за определенными погрузочными пунктами, к сложным – системы, в которых нет этого ограничения, т.е. для каждого автосамосвала нет строго обусловленного маршрута на протяжении всей рабочей смены. На некоторых карьерах возможно использовать автотранспортные системы смешанного типа: на добыче полезного ископаемого – сложную, на вскрыше – простую, или наоборот (Ковдорский ГОК).

По типажу транспортных средств различают однотипные и многотипные автотранспортные системы: в первых используются автосамосвалы (автопоезда) одной марки, но разных лет выпуска, во вторых – автосамосвалы (автопоезда) различных марок (обычно две-три) и разных лет выпуска. К многотипным относятся также транспортные системы, в которых на добыче полезного ископаемого применяют только автосамосвалы, а на вскрыше – только автопоезда, или наоборот (Нерюнгринский угольный разрез).

По "возрасту" системы автотранспорта делятся на три типа: с ускоренным, равномерным и замедленным темпами обновления однотипных транспортных средств по мере их физического износа в процессе эксплуатации. Критерием темпа обновления является соотношение фактического средневзвешенного возраста парка автосамосвалов $T_{ср}$ и оптимального его значения в данный момент $T_{опт}$, либо соотношение средневзвешенного фактического пробега среднесписочного автосамосвала в парке $L_{ср.в}$ и оптимального его значения $L_{опт}$:

$$k_{т.о}=T_{ср.в}/T_{опт} \qquad \text{или} \qquad k_{т.о}=L_{ср.в}/L_{опт}.$$

Средневзвешенный возраст среднесписочного автосамосвала в транспортной системе и его средневзвешенный пробег определяются по формулам

$$T_{ср.в}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}T_i\,n_j}{N} \qquad L_{ср.в}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}L_i\,n_j}{N}$$

где T_i, L_i – соответственно возраст и пробег i-го автосамосвала с начала эксплуатации; n_j – число автосамосвалов одинакового возраста или с одинаковым пробегом; N – общее число автосамосвалов в транспортной системе.

Оптимальным называется такое значение $T_{опт}$ или $L_{опт}$, которое обеспечивает заданную производительность транспортной системы с учетом снижения производительности каждой транспортной единицы в отдельности по мере увеличения степени ее физического износа в процессе эксплуатации.

Для систем с ускоренным темпом обновления $T_{ср.в} < T_{опт}$, т.е. $k_{т.о} < 1$, с равномерным $T_{ср.в} = T_{опт}$ ($k_{т.о} = 1$) и с замедленным $T_{ср.в} > T_{опт}$ ($k_{т.о} > 1$).

Анализ автотранспортных систем действующих карьеров показал, что для них характерен замедленный темп обновления транспортных средств, что отрицательно сказывается на результатах работы. Ускоренным темпом обновляются транспортные средства на строящихся и развивающихся карьерах при ежегодном увеличении объема производства.

По суммарной грузоподъемности автотранспортных средств $\sum q_a$ различают системы малой мощности с $\sum q_a <$ 1000 т, средней – с q_a = 1000–2500 т, мощные – с q_a = 2500–5000 т и особо мощные – с $q_a >$ 5000 т.

По организационной структуре современные системы карьерного автотранспорта можно разделить на четыре группы (схема I). На ряде крупных карьеров (Центральный апатитовый) система карьерного автотранспорта организационно входит в состав рудника на правах отдельного технологического участка. Пятилетний опыт применения такой организации подтвердил определенные ее преимущества в специфических, очень сложных условиях работы этого рудника: бо́льшую согласованность работы с другими участками, простоту диспетчерского управления, возможность использования для ремонтов транспортных средств ремонтной базы рудника и др. На большинстве карьеров Севера используется вторая форма организации систем автотранспорта – отдельный цех горнообогатительного комбината или производственного объединения.

На угольных разрезах применяется в основном третья форма, когда все технологические перевозки осуществляются крупными специализированными автотранспортными предприятиями (автобазами, трестами), которые хотя административно не подчиняются данному угольному разрезу, но входят в то же министерство.

Четвертая форма организационной структуры систем технологического автотранспорта нашла применение в основном на предприятиях строительных министерств и промышленности стройматериалов, которые привлекают для выполнения транспортных работ специализированные предприятия республиканских министерств автомобильного транспорта.

По способу управления грузопотоком все автотранспортные системы карьеров Севера относятся к первому типу – в 1980 г. они работали без применения АСУ ТП, хотя значительно упрощенные технические системы управления транспортом внедрены на Ковдорском, Ждановском и других карьерах. В стадии реализации находятся проекты АСУ ТП на Центральном апатитовом, Оленегорском и других карьерах. Во всех известных АСУ ТП пока не используются встроенные (в экскаватор, автосамосвал) информационные системы учета выполненной работы: перевезенной горной массы, количества рейсов, расхода топлива.

Предложенная классификация систем карьерного автотранспорта отражает происшедшие за последние 10–15 лет изменения в условиях их применения на открытых разработках, более полно учитывает факторы, оказывающие влияние на эффективность функционирования системы.

Под системой карьерного автотранспорта понимается совокупность объектов: погрузочных и транспортных средств, их операторов, транспортных ком-

муникаций, сооружений для производства технического обслуживания и ремонта машин, средств управления и пр., - имеющих определенную структуру функциональных связей, которая предназначена для создания грузопотока полезного ископаемого и (или) вскрышных пород заданной мощности и направления.

Современные системы карьерного автотранспорта можно представить структурно как совокупность взаимно связанных между собой подсистем (схема 2).

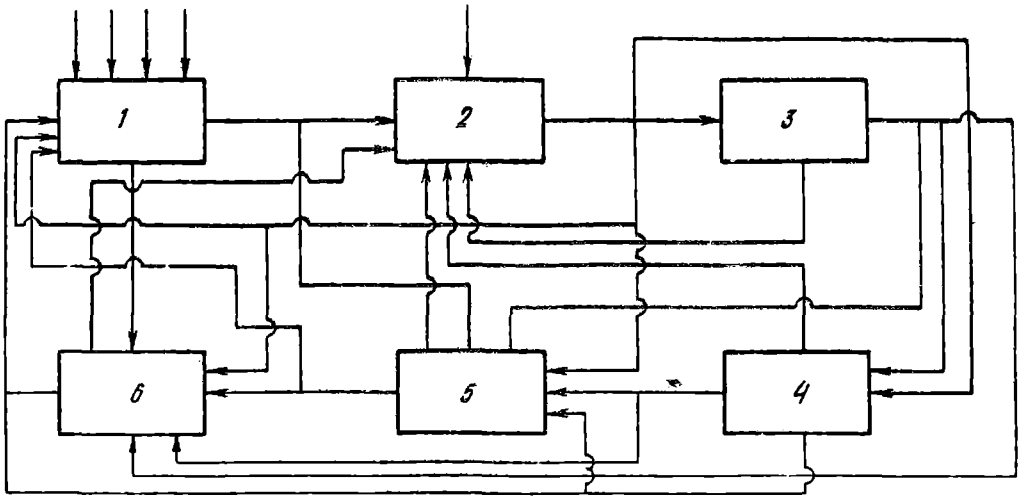


Схема 2. Структура связей между подсистемами в системе карьерного автотранспорта
1 - экскаватор с оператором; 2 - автосамосвал с оператором; 3 - транспортные коммуникации; 4 - приемные пункты; 5 - сооружения и средства технической эксплуатации машин; 6 - сооружения и средства управления погрузочно-транспортным процессом

При построении математической модели системы карьерного автотранспорта использован метод объединения матриц преобразования отдельных операторов в соответствии с топологией и структурной схемой системы. Такой подход позволяет наиболее полно описать ее и сочетает в себе возможность полной формализации и точность.

Расчет и оптимизация транспортной системы с помощью операционных матриц заключается в составлении эквивалентной матрицы преобразования системы, которая выражает зависимость всех переменных системы:

$$[C]\times[X^{(1)},X^{(2)},\ \ldots X^{(k)}\ \ldots X^{(N)},\ Y_0]^T=0, \qquad (1)$$

где $[C]$ - эквивалентная матрица преобразования системы; $X^{(k)}$ - вектор-столбец выходных переменных k-го оператора; Y_0 - вектор-столбец выходных переменных системы; T - символ транспортирования матрицы.

Получение эквивалентной матрицы преобразования позволяет формализовать задачу расчета транспортной системы и свести ее к безитерационному решению системы линейных уравнений путем применения аппарата теории матриц к составлению математической модели транспортной системы, представленной в виде структурной схемы. На этой схеме каждый оператор изображен в виде блока, математическая модель которого представляет собой матрицу преобразования, а связь между блоками осуществляется векторами параметров состояния соответствующих потоков системы.

Согласно структурной схеме 2 математическая модель системы в общем виде может быть записана уравнениями

$$[C_1]\times[X_1^{(1)}, X_1^{(2)}, \ldots, X_1^{(k)}, \ldots, X_1^{(N)}] + [B_1]\times U = 0; \qquad (2)$$

$$[Y_0] = [C_2]\times[X_1^{(1)}, X_1^{(2)}, \ldots, X_1^{(k)}, \ldots, X_1^{(N)}] + [B_2]\times U = 0, \qquad (3)$$

где $[C_1], [C_2], [B_1], [B_2]$ – эквивалентные матрицы преобразования системы; $X_1^{(k)}$ – вектор-столбец входных переменных k-го элемента, кроме U ; U – вектор-столбец входных переменных системы.

Для нахождения элементов матриц преобразования воспользуемся статистическим методом. В случае использования этого метода связь входных и выходных параметров системы имеет вид

$$[Y] = F(X). \qquad (4)$$

Для транспортной системы, которую мы рассматриваем как линейную, что подтверждается статистическим анализом, связь входных и выходных величин в общем случае имеет вид

$$[Y] = [A]\times[X] \qquad (5)$$

Применение статистического метода для нахождения коэффициентов матриц преобразования операторов приводит к необходимости использования методов планирования эксперимента. Учитывая большое число входных и выходных параметров системы, а также ее линейность, для нахождения корреляционных уравнений вида

$$y_j = a_0^{(j)} + \sum_i a_i^{(j)} x_i + \sum_{i,k} a_{ik}^{(j)} x_i x_k + \sum_{i,k,c} a_{ikc}^{(j)} x_i x_k x_c \qquad (6)$$

был выбран дробный факторный план. Коэффициент a_{ik} в уравнении (6) является мерой парного взаимодействия, коэффициент a_{ikc} отражает воздействие тройного взаимодействия.

На основании физической модели транспортной системы функциональная связь между параметрами системы для каждой из подсистем в общем виде следующая: для подсистемы I

$$V_1 = \left\{ E_1 N_{э.уд}, m', m'', G_э, v_э, k'_{т.к}, k'_{г.т}, k_{ф.и}, k'_{г.э}, k_э \right\}, \qquad (7)$$

для подсистемы 2

$$V_2 = \left\{ q_а, N_{а.уд}, k_т, v_а, R, k''_{г.к}, k''_{г.т}, k''_{ф.и}, k_{г.э}, k_а, S_к, k_{в.а} \right\}; \qquad (8)$$

для подсистемы 3

$$V_3 = \left\{ L, H, i_{ср.в}, i_р, J, C, n_с, n_п, B, f_{ср.в}, \varphi, C_{к.д}, C_{э.д}, L_д, t_{сл.д} \right\}, \qquad (9)$$

для подсистемы 4

$$V_4 = \left\{ l'_{а.ф}, l''_{а.ф}, N_{а.р}, w_{отв}, t_р, n_{пс}, Q_{пр}, t_м \right\}; \qquad (10)$$

для подсистемы 5

$$V_5 = \left\{ k_{\text{п}}, n_{\text{п.уд}}, C_{\text{к.г.х}}, C_{\text{г.х}} \right\}; \qquad (11)$$

для подсистемы 6

$$V_6 = \left\{ y_{\text{р.и}}, N_{\text{а max}}, C_{\text{к.у}}, C_{\text{у}} \right\}, \qquad (12)$$

где $C_{\text{к.д}}$ – капитальные затраты на строительство дорог; $C_{\text{э.д}}$ – эксплуатационные расходы на содержание и ремонт дорог; $C_{\text{к.г.х}}$ – капитальные затраты на гаражное хозяйство на один автосамосвал; $C_{\text{г.х}}$ – эксплуатационные расходы на гаражное хозяйство на один автосамосвал; подробная расшифровка остальных величин приведена в работе [2]

Матрицы преобразования операторов транспортной системы согласно структурной схеме имеют вид

$$\begin{pmatrix} Q_{\text{э}} \\ C_{\text{э}} \\ \text{Э}_{\text{з}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^1_{11}\ a^1_{12} & a^1_{1\,11} \\ a^1_{21}\ a^1_{22} & a^1_{2\,11} \\ a^1_{31}\ a^1_{32} & a^1_{3\,11} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} E \\ N_{\text{э.уд}} \\ m' \\ m'' \\ G_{\text{э}} \\ v_{\text{э}} \\ k'_{\text{г.к}} \\ k_{\text{г.т}} \\ k'_{\text{ф.и}} \\ k'_{\text{г.э}} \\ k_{\text{э}} \end{pmatrix}; \qquad (13)$$

$$\begin{pmatrix} v_{\text{дв}} \\ Q_{\text{а}} \\ C_{\text{а}} \\ \text{Э}'_{\text{з}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^2_{11}\ a^2_{12} & a^2_{1\,12} \\ a^2_{21}\ a^2_{22} & a^2_{2\,12} \\ a^2_{41}\ a^2_{42} & a^2_{4\,12} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_{\text{а}} \\ N_{\text{а.уд}} \\ k_{\text{т}} \\ v_{\text{а}} \\ R \\ k''_{\text{г.к}} \\ k''_{\text{г.т}} \\ k''_{\text{ф.и}} \\ k''_{\text{г.э}} \\ k_{\text{а}} \\ S_{\text{к}} \\ k_{\text{в.а}} \end{pmatrix}; \qquad (14)$$

$$\begin{pmatrix} C_{к.д} \\ C_{э.д} \\ P \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^3_{11} & a^3_{12} & a^3_{1\,14} \\ a^3_{21} & a^3_{22} & a^3_{2\,14} \\ & & \\ a^3_{41} & a^3_{42} & a^3_{4\,14} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} L_{дб} \\ L_{дщ} \\ H \\ i_{ср.в} \\ i_{р} \\ J \\ C \\ n_{с} \\ n_{п} \\ B \\ \omega_{ср.в} \\ \varphi \\ t_{сл.д} \\ l_i \end{pmatrix}, \qquad (I5)$$

$$\begin{pmatrix} Q_0 \\ C_{к.0} \\ C_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^4_{11} & a^4_{12} & a^4_{18} \\ a^4_{21} & a^4_{22} & a^4_{28} \\ a^4_{31} & a^4_{32} & a^4_{38} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l'_{оф} \\ l''_{оф} \\ N_{ор} \\ \omega_{отв} \\ t_{р} \\ n_{п.с} \\ Q_{пр} \\ t_{м} \end{pmatrix}; \qquad (I6)$$

$$\begin{pmatrix} C_{к.г.х} \\ C_{г.х} \\ N_{г.х} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^5_{11} & a^5_{12} \\ a^5_{21} & a^5_{22} \\ a^5_{31} & a^5_{32} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} k_{п} \\ n_{п.уд} \end{pmatrix}; \qquad (I7)$$

$$\begin{pmatrix} Q_э \\ Q_а \\ Q_д \\ Q_0 \\ Q_{г.х} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^6_{11} & a^6_{12} & a^6_{14} \\ a^6_{12} & a^6_{22} & a^6_{24} \\ & & \\ a^6_{51} & a^6_{52} & a^6_{54} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} y_{р.и} \\ N_{а\,max} \\ C_{к.у} \\ C_{у} \end{pmatrix}, \qquad (I8)$$

где $Q_э$ – техническая производительность экскаватора; $C_э$ – себестоимость экскавации; $Э_э$ – эксплуатационные затраты на экскавацию; $v_{дв}$ – скорость движения автосамосвала; $Q_а$ – техническая производительность автосамосвала; $C_а$ – себестоимость транспортирования; $Э'_э$ – эксплуатационные затраты на транспорт; P – производительность труда в целом по системе; M – интенсивность грузопотока; $Q_о$ – производительность отвалообразования (грузопоток вскрышных пород на отвалы); $C_{к.о}$ – капитальные затраты на отвалообразование; $C_о$ – себестоимость отвалообразования; $N_{г.х}$ – число автосамосвалов в гаражном хозяйстве; $Q_д$ – производительность транспортных коммуникаций (провозная способность дорог); $Q_{г.х}$ – производительность гаражного хозяйства (базы технической эксплуатации машин).

Коэффициенты матричных уравнений a_{ij} определяются на основе статистических испытаний отдельных элементов системы согласно уравнению (6).

Операционные матрицы отдельных подсистем транспортной системы построены на основе анализа структурной схемы путем выражения ее эквивалентной операционной матрицы через матрицы операторов $[A_k]$. Для получения эквивалентных матриц преобразования использовано правило свертки. Согласно этому правилу матрица эквивалентного преобразования имеет вид

$$X^{(N)} = \left(E - A_N \dots A_1 \dots A_2 \times H_1\right)^{-1} \times A_N \times A_{N-1} \quad . A_1 \times X^{(o)} \qquad (19)$$

Таким образом, решение задач оптимизации систем карьерного автотранспорта сводится к решению линейных уравнений (2) и (3) с учетом (6) при заданных значениях входных параметров U

Для оптимизации транспортной системы выбран один из методов декомпозиции – метод многоуровневой оптимизации. Данный метод позволяет провести декомпозицию общей задачи оптимизации системы по принципу последовательной оптимизации подсистем. В предлагаемой работе метод осуществляется на двух уровнях. На первом подсистемы оптимизируются в пределах собственных границ. Второй уровень служит для согласования первых уровней оптимизации с целью достижения общего оптимума системы.

Одно из важных достоинств метода многоуровневой оптимизации заключается в том, что с его помощью можно значительно сократить машинное время при решении задач данного класса или оперативную память ЭВМ. Многоуровневый алгоритм осуществляет последовательность итераций по информационным переменным, которые не удовлетворяют ограничениям взаимных связей системы до тех пор, пока не достигнут глобальный оптимум системы.

Применительно к оптимизации систем карьерного автотранспорта задача состоит в нахождении экстремальных значений следующих основных величин: производительности системы (производительности труда), приведенных капитальных затрат с учетом создания необходимой инфраструктуры предприятия, себестоимости продукции, надежности системы. Это выходы системы.

Оптимизирующими переменными являются входы системы, которые укрупненно могут быть представлены следующими переменными величинами: заданным годовым объемом добычи горной массы A или грузооборота AL; числом часов работы в году экскаваторов $T_э$ и автосамосвалов $T_а$;

физико-механическими свойствами разрабатываемых пород; заданным уровнем качества полезного ископаемого по содержанию полезного компонента (требования к усреднению руд); коэффициентом развития трассы; высотными отметками над уровнем моря; климатическими характеристиками района; географическим расположением карьера.

Предложенная модель оптимизации автотранспортных систем апробирована для условий Центрального рудника производственного объединения "Апатит" и Ждановского рудника комбината "Печенганикель". В результате проведенных исследований разработано методическое руководство для проектных организаций и горнодобывающих предприятий по выбору оптимального типа экскаваторно-автомобильных комплексов для условий конкретного карьера [I] .

ЛИТЕРАТУРА

1. Выбор оптимального типа экскаваторно-автомобильного комплекса для условий конкретного карьера. Методическое руководство. Руководитель и отв. исполнитель А.А.Кулешов. М., изд.Минцветмета, 1980.

2. Кулешов А.А. Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы карьеров. М., Недра, 1980.

3. Станфорд Л.Оптнер. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. М., Советское радио, 1969.