

УДК 656.07+06

Генетический компоновочный алгоритм размещения объектов транспортного узла: постановка задачи, формирование и использование массивов данных, методика решения

О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева, Н. М. Луганченко

Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Числов О. Н., Мизгирева Е. Е., Луганченко Н. М. Генетический компоновочный алгоритм размещения объектов транспортного узла: постановка задачи, формирование и использование массивов данных, методика решения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 32–46. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-32-46

Аннотация

Цель: Изложить принципы формирования генетического компоновочного алгоритма при разработке метода размещения объектов транспортного узла, использования и обработки массивов данных. **Методы:** На основе анализа публикаций в направлении данных исследований применена методологическая база генетических алгоритмов, авторские решения линейных диофантовых уравнений в параметризации зон узла, учитываемых при постановке компоновочных задач. **Результаты:** В статье разработан авторский метод решения прикладной задачи размещения объектов транспортного узла в условиях нечетких постановок направлений исследования, формирования массивов данных, их оценки и выбора рациональных вариантов с применением метода Парето и авторского генетического компоновочного алгоритма. Исследована возможная адаптация транспортных характеристик зон узла к перспективным направлениям цифровизации и интеллектуализации инфраструктурно-технологического взаимодействия. **Практическая значимость:** На примере зон узла представлен авторский метод решения прикладной задачи, формирования массивов данных, их оценки и выбора рациональных вариантов с применением метода Парето и генетического компоновочного алгоритма, получен эффект за счет улучшения транспортных связей, рационализации параметров зон, повышения рейтинга узла.

Ключевые слова: Транспортный узел, зоны узла, параметры транспортной работы, математическое моделирование, генетический компоновочный алгоритм, линейные диофантовы уравнения, метод Парето, большие данные.

Введение

Несмотря на санкционные воздействия и кризисные ограничения, обеспечиваются устойчивые показатели работы транспорта РФ за счет рационального развития инфраструктуры, внедрения новых цифровых ресурсов и интеллектуальных информационных технологий, формирования эффективных транспортно-логистических цепей доставки грузов. По данным [1, 2], железнодорожным транспортом за 2023 г. перевезено

1 208,3 млн пасс. (+5,8 % к показателю 2022 г.), погружено 1 235,3 млн т грузов (–0,1 % к показателю 2022 г.), грузооборот составил 2 638,3 млрд тарифных т-км (+0,02 % к показателю 2022 г.). Суммарный грузооборот морских портов Азово-Черноморского бассейна за 10 месяцев 2023 г. составил 251,3 млн т (+17,2 % к периоду 2022 г.).

Транспортный комплекс юга России основывается на многофункциональной и интегрированной системе производственных и транспортных

Таблица 1. Показатели основных транспортных узлов юга России

Транспортный узел	Площадь узла, S , км ²	Население, N , тыс. чел.	Кол-во видов магистрального / городского тр-га, T_M / T_G	Протяженность узловых автомобильных дорог, $L_{авт}$, км	Протяженность узловых железнодорожных путей, $L_{жд}$, км	Протяженность водных путей, $L_{вод}$, км	Коэффициент перспективы развития ВСМ, $V \cdot 100$	Кол-во линий узловых МПК, $N_k \cdot 100$	Класс узла, $R_{ТУi}$ [3]
«А»	208	524	4/1	168,2	78,6	31,2	100	600	37,98
«В»	859	1005	4/5	201,3	147,6	61,6	100	600	59,18
«К»	294	1107	4/4	133	79,2	36,3	300	200	55,36
«Р»	248	1138	4/5	134,9	83,4	26,9	300	700	57,58
«М»	468	604	4/3	97,1	39,6	—	100	200	57,1
«СЧ»	3506	564	4/4	89,3	61,5	—	100	1000	60,88
«ТГ»	80	245	3/5	73,3	32,1	—	0	200	41,62
«ВЛ»	291	296	3/2	49,4	11,1	—	0	200	46,82

технологий, которая включена в экономическую структуру РФ. Юг России имеет густую сеть железных и автомобильных дорог, водных путей, а также обширную систему трубопроводного транспорта.

Транспортные узлы юга России выполняют важнейшие функции: обеспечение непрерывности перевозок грузов и пассажиров, поддержание работоспособности крупных южнороссийских глубоководных портов, экономическая интеграция, сохранение обороноспособности региона и страны в целом. Пространственно-планировочные и инфраструктурно-технологические показатели важнейших узлов юга России сведены в табл. 1.

В связи с современным развитием науки и техники, усложнением и формированием новых логистических цепей, новыми вызовами и требованиями, предъявляемые к перевозкам, необходима разработка инновационных мероприятий по сбалансированному развитию узловой инфраструктуры, видов транспорта при решении задачи размещения объектов и формирование эффективных связей между ними [3].

Теоретические основы метода

В статье разрабатывается новый метод поиска решений компоновочных транспортных задач, учитывающих случайный выбор, нечеткие множества параметров, комбинирование и вариацию массивов больших данных с использованием аналогий естественного отбора в природе. Рассмотрена модификация и применение генетического алгоритма (ГА) в решении задачи размещения зон транспортных узлов («отбор»), их развитие («эволюция и наследование») и изменение («мутации», «скрещивание»). Вопросы применения ГА в научных исследованиях рассматривались в трудах Н. Баричелли (1954 г.), А. Фазера (1957 г.), Г. И. Бремерманна (1960 г.), Барнелла (1970 г.), Кросби (1973 г.), Д. Холланда (1975 г.) и др. [4, 5].

Задача развития ГА в части разработки генетического компоновочного алгоритма размещения объектов транспортного узла (ГКА ТУ) формулируется следующим образом: на заданной территории необходимо наиболее рациональным образом разместить зоны ТУ (производственные, транспортно-складские, защитные, селитебные, рекреационные и др.), чтобы сумма транспорт-

ных расходов на грузо- и пассажирские перевозки в узле была минимальна, а также соблюдались общесистемные требования и ограничения, применяемые к компоновочным решениям (экологические, строительные, транспортной безопасности, надежности и т. п.).

Формулировка задачи:

$$\Pi(L) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p \left(C_{ijk}^{\text{жд}} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{\text{жд}} \cdot Q_{ijk}^{\text{жд}} + C_{ijk}^{\text{авт}} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{\text{авт}} \cdot Q_{ijk}^{\text{авт}} + \right. \\ \left. + C_{ijk}^{\text{вод}} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{\text{вод}} \cdot Q_{ijk}^{\text{вод}} + C_{ijk}^{\text{гт}} \cdot A^T \{L^*(CD)\}_{ijk}^{\text{гт}} \cdot a_{ijk}^{\text{гт}} + \dots \right) \rightarrow \min,$$

где C — стоимость перевозки грузов (пассажиров) видами узлового транспорта, руб/т-км (руб/пасс-км);
 $A^T \{L^*(CD)\}$ — транспонированная матрица модифицированных расстояний перевозки видов транспорта с учетом коэффициента дивергенции зоны узла при кластеризации территории [6, 7];
 Q — объем перевозок грузов видами узлового транспорта i -й зоны узла, тыс. т;
 a — объем перевезенных пассажиров видами узлового транспорта i -зоны узла, тыс. пасс.

Предварительный этап построения математической модели

Для целей формализации ГКА ТУ модифицируется понятийный аппарат: «популяция» — количество объектов транспортных зон с параметрами, соответствующими условиям проектирования; «размножение» — процесс получения новой транспортной зоны на основе наследуемых параметров исходных двух зон («родитель1» — P1 и «родитель2» — P2); «отбор» — выбор из «популяции» тех зон, которые соответствуют установленным критериям рациональности проектирования; «хромосома» — набор параметров конкретной зоны ТУ; «хромосома размещения» (ХР) зон представляет собой связанный список пар координат центров тяжести транспортных зон, участвующих в размещении; «хромосома модификации» (ХМ) зон представляет собой связанный список параметров транспортных зон, участвующих в модификации; кроссинговер — «скрещивание» зон; «оператор мутации» — это вероятностное изменение случайной позиции «хромосомы» — пар координат центров тяжести транспортных зон или вероятностная модификация пар параметров транспортных зон, из которых образуется новая зона; «завершение эволюции» — достижение параметров, определяемых целями компоновки. Следует отметить, что при данном подходе в решении задачи размещения объектов транспортного узла необходимо формирование и использование больших массивов данных.

Рассмотрим данный подход в моделировании размещения зон узла «Р». На рис. 1 представлена схемная матрица узла с точками входа-выхода грузопотоков, геометрическими фигурами основных зон, укрупненным графом транспортных связей и вариантом переноса (объединения) промышленных зон «С-П» и «Р-Т», «Р-Г» и «Р-З».

Размещение зон транспортного узла на принципах ГКА ТУ

Первоначальное размещение зон производится на заданной площади координатной матрицы узла. Каждый объект характеризуется размерами, площадью и представляется правильной или неправильной геометрической фигурой. Находится и оценивается вариант размещения узловых объектов по координатам центра тяжести $\{(x_{\text{цтз1}}, y_{\text{цтз1}}), \dots, (x_{\text{цтзи}}, y_{\text{цтзи}})\}$.

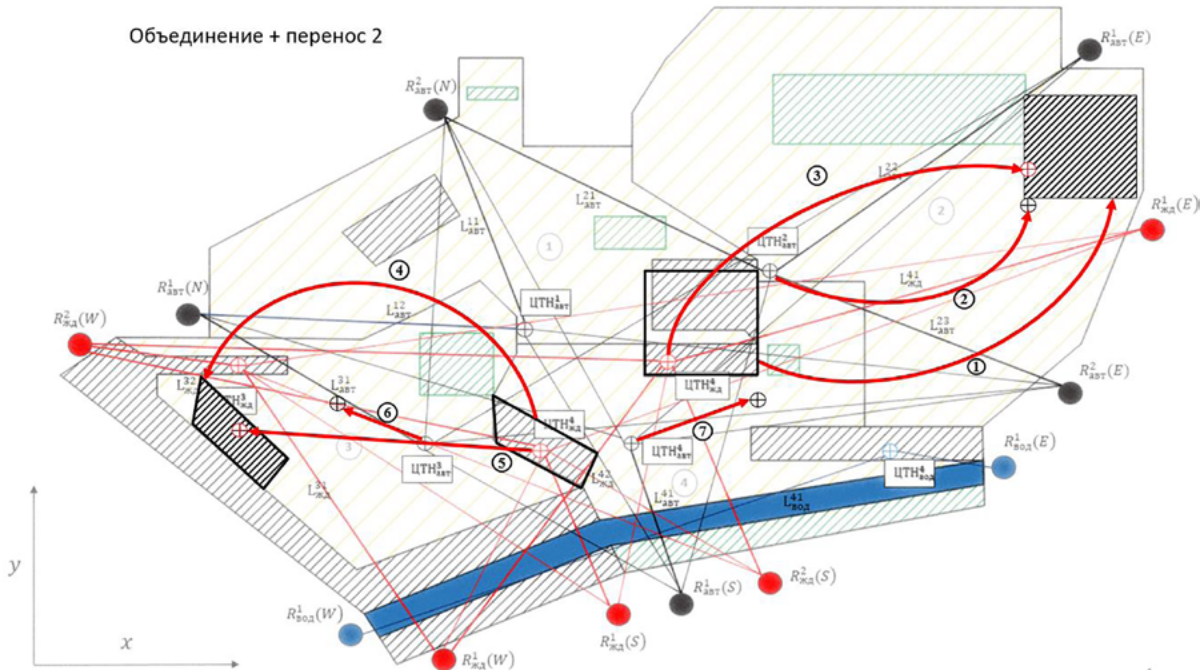


Рис. 1. Матрица транспортного узла «Р» с вариантами перемещения (объединения) зон «С-П» и «Р-Т», «Р-Г» и «Р-З»

Условия компоновки: площадь перекрытия площадей размещенных узловых объектов должна быть равна нулю, $\sum S_{пер} \rightarrow 0$; суммарная длина транспортных коммуникаций между зонами и точками входа-выхода (пассажиро-) грузопотоков должна быть минимальная, $\sum L(z_j) \rightarrow \min$.

Решение задачи размещения представляется минимизацией функции, выражающей оценку суммы штрафов за перекрытие площадей размещаемых объектов узла и общей длины транспортных связей [2, 7]:

$$P = \sum_{j=1}^n \left(k \cdot G(L(z_j)) + f(S_{пер}(z_j)) \right) \rightarrow \min,$$

где z_j — вариант размещения;

k — весовой коэффициент важности зоны узла;

$S_{пер}$ — общая площадь перекрытия площадей размещаемых узловых объектов;

$G(L(z_j))$ — оценка общей длины транспортных коммуникаций, приведенная к интервалу [0,1];

$f(S_{пер}(z_j))$ — функция штрафов за перекрытие площадей объектов узла, принимающая значения из интервала [0,1].

При размещении объектов согласно ГКА ТУ «хромосома» зоны кодируется списком пар {«номер гена», «значение гена»}, «номер гена» — номер размещаемого транспортного объекта, а «значение гена» — пара координат центра тяжести размещаемой зоны.

На втором этапе решается задача перемещения, объединения, модификации или ликвидации зон узловых объектов при реконструкции (развитии) ТУ. Для этого используется модифицированный алгоритм «размножения» ГКА ТУ: выбираются пары зон ТУ — «родителей» («родитель1» — P1 и «родитель2» — P2), у которых за счет объединения будет по одному «потомку» «П(1,2)» — новой зоны ТУ с параметрами преобладания данных P1 или P2. Для этого используется «кроссинговер» вида «|». При

$$\left(\begin{array}{l} X.-P1:a1|b1,c1,d1,e1,f1 X.-P2:a2|b2,c2,d2,e2,f2 X.-\Pi(1,2):a1,b2,c2,d2,e2,f2 \text{ or } a2,b1,c1,d1,e1,f1; \\ X.-P1:a1,b1|c1,d1,e1,f1 X.-P2:a2,b2|c2,d2,e2,f2 X.-\Pi(1,2):a1,b1,c2,d2,e2,f2 \text{ or } a2,b2,c1,d1,e1,f1; \\ X.-P1:a1,b1,c1|d1,e1,f1 X.-P2:a2,b2,c2|d2,e2,f2 X.-\Pi(1,2):a1,b1,c1,d2,e2,f2 \text{ or } a2,b2,c2,d1,e1,f1; \\ X.-P1:a1,b1,c1,d1|e1,f1 X.-P2:a2,b2,c2,d2|e2,f2 X.-\Pi(1,2):a1,b1,c1,d1,e2,f2 \text{ or } a2,b2,c2,d2,e1,f1; \\ X.-P1:a1,b1,c1,d1,e1|f1 X.-P2:a2,b2,c2,d2,e2|f2 X.-\Pi(1,2):a1,b1,c1,d1,e1,f2 \text{ or } a2,b2,c2,d2,e2,f1; \end{array} \right)$$

Рис. 2

модификации объектов узла согласно ГКА ТУ «хромосома» кодируется списком $(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i)$ — набор параметров i -й транспортной зоны, определенный в безразмерных величинах (по данным табл. 1). Варианты выбора параметров для $X.-P1 \wedge X.-P2 \rightarrow X.-\Pi(1,2)$ показаны на рис. 2.

Затем определяются варианты стратегии развития зон ТУ на основе коэффициента дивергенции

$$[6] \quad CD(ТУ) = \sqrt{\frac{1}{p} \left\{ \sum_{k=1}^p \left(\frac{x_{ki} - x_{kj}}{x_{ki} + x_{kj}} \right)^2 \right\}} \rightarrow \min \text{ и показателей ТУ, выраженных в безразмерной форме,}$$

одним из которых является класс узла $R_{ТУ} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(K_{\text{опт } i} \cdot \frac{1}{u} \right)$, где K — количество критериев,

$K_{\text{опт } i}$ — оптимальное стратегическое решение по i -критерию, u — значение приоритета $u \in (1; N)$ для N — количества вариантов развития узла.

Для оценки степени пригодности («выживаемости») зон ТУ используются множества линейных диофантовых уравнений (ЛДУ) [8], количество которых равняется количеству зон. Общий вид уравнения: $T \cdot a_i + L \cdot b_i + B \cdot c_i + S \cdot d_i + A \cdot e_i + P \cdot f_i = R_{ТУ i}$, где T — безразмерный показатель, характеризующий количество видов транспорта зоны; B — показатель ширины зоны; L — показатель длины зоны; S — показатель площади зоны; A — показатель населенности зоны; $R_{ТУ i}$ — класс узла; P — специальный градостроительный показатель зоны ($INT(P) = \pm \alpha_1 \cdot p_1 \pm \alpha_2 \cdot p_2 \pm \alpha_3 \cdot p_3 \dots \pm p_8 \cdot \alpha_8$, где p_1 — грузооборот зоны, тыс. т, p_2 — пассажирооборот зоны, тыс. чел., p_3 — срок службы, год ввода в эксплуатацию зоны; p_4 — плотность застройки зоны (коэффициент застройки), плотность транспортной сети на 1 тыс. хозяйствующих субъектов региона; p_5 — государственная, региональная, социальная, градостроительная значимость; p_6 — категория отрасли промышленности (легкая/тяжелая, обрабатывающая/добывающая, местная/региональная) и показатель уровня транспортного обслуживания структурных отраслей промышленности; p_7 — надежность и устойчивость (развитость) транспортных связей (коммуникаций); p_8 — коэффициент эффективности узловой системы); p_9 — соответствие экологическим нормам, углеродный след; p_{10} — соответствие госпрограммам развития, экономическая потребность в развитии зоны, привлекательность для бизнеса и населения. Данные расчета показателя зоны P представлены в табл. 2.

При решении ЛДУ зон по вариантам размещений результаты больших значений отклонений от имеющихся параметров зоны будут исключаться, так как имеют меньший коэффициент выживаемости. Цикл действий алгоритма повторяется итеративно для имитации «эволюционного процесса» через несколько жизненных циклов («поколений»), пока не будет выполнен один из критериев остановки алгоритма — достижение желаемых параметров компоновки узла [5].

Таблица 2. Ведомость данных расчета показателя P зоны узла

Зона ТУ	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	$INT(P)$
«С-П»	+0,8	+0,9	+0,9	+0,9	+3	+1	+0,1	+0,3	-0,9	+1	8
«Р-Т»	+0,4	+0,3	+0,4	+0,6	+1,5	+0,3	+0,2	+0,3	-0,5	+0,2	3,9
«Р-З»	+0,8	+0,6	+0,4	+0,6	+2,2	+0,4	+0,6	+0,7	-0,2	+0,3	6,4
«Р-Г»	—	+0,8	+0,6	+0,7	+2,5	+0,3	+0,4	+0,8	-0,8	+0,3	5,6

Таблица 3. Ведомость количества решений ЛДУ при размещении зоны «С-П»

Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$	Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$
0	603	3070	2163	4584	603	3874	21–22	141	0	0	0	141	0
1	540	2138	1711	2415	540	2356	23–24	119	0	0	0	119	0
2	540	1435	1334	1124	540	1334	25–26	101	0	0	0	101	0
3	480	921	1022	435	480	686	27–28	84	0	0	0	84	0
4	480	559	769	124	480	308	29–30	70	0	0	0	70	0
5	427	315	565	19	427	112	31–32	57	0	0	0	57	0
6	427	161	405	0	427	28	33–34	47	0	0	0	47	0
7	377	71	281	0	377	3	35–36	37	0	0	0	37	0
8	377	25	188	0	377	0	37–38	30	0	0	0	30	0
9	333	6	120	0	333	0	39–40	23	0	0	0	23	0
10	333	0	72	0	333	0	41–42	18	0	0	0	18	0
11	291	0	40	0	291	0	43–44	13	0	0	0	13	0
12	291	0	20	0	291	0	45–46	10	0	0	0	10	0
13	255	0	8	0	255	0	47–48	7	0	0	0	7	0
14	255	0	3	0	255	0	49–50	5	0	0	0	5	0
15–16	221	0	0	0	221	0	51–52	3	0	0	0	3	0
17–18	192	0	0	0	192	0	53–54	2	0	0	0	2	0
19–20	164	0	0	0	164	0	55–58	1	0	0	0	1	0

Таблица 4. Ведомость количества решений ЛДУ при размещении зоны «Р-Т»

Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$	Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$
0	627	2907	1201	2550	627	1201	16	60	0	0	0	60	0
1	574	1344	956	1375	574	956	17	53	0	0	0	53	0
2	500	515	750	650	500	750	18	39	0	0	0	39	0
3	456	144	579	264	456	579	19	34	0	0	0	34	0
4	393	21	439	78	393	439	20	24	0	0	0	24	0
5	357	0	326	14	357	326	21	21	0	0	0	21	0
6	304	0	236	0	304	236	22	14	0	0	0	14	0
7	275	0	166	0	275	166	23	12	0	0	0	12	0
8	231	0	113	0	231	113	24	7	0	0	0	7	0
9	208	0	73	0	208	73	25	6	0	0	0	6	0
10	172	0	45	0	172	45	26	3	0	0	0	3	0
11	154	0	26	0	154	26	27	3	0	0	0	3	0
12	125	0	13	0	125	13	28	1	0	0	0	1	0
13	111	0	6	0	111	6	29	1	0	0	0	1	0
14	88	0	2	0	88	2	30–58	0	0	0	0	0	0
15	78	0	0	0	78	0							

Таблица 5. Фрагмент ведомости количества решений ЛДУ при размещении зоны «Р-3»

Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$	Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$
0	327	169	327	3465	1568	436	27	59	0	59	0	0	0
1	310	980	310	717	1461	1132	28	57	0	57	0	0	0
2	297	784	297	19	733	845	29	50	0	50	0	0	0
3	286	618	286	0	314	616	30	45	0	45	0	0	0
4	267	478	267	0	106	436	31	41	0	41	0	0	0
...

Таблица 6. Фрагмент ведомости количества решений ЛДУ при размещении зоны «Р-Г»

Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$	Значение	$a(i)$	$b(i)$	$c(i)$	$d(i)$	$e(i)$	$f(i)$
0	651	1020	2317	2535	1020	1020	26	119	5	0	0	5	0
1	369	910	2059	2160	910	1910	27	47	3	0	0	3	0
2	585	810	1141	1008	810	1283	28	15	2	0	0	2	0
3	325	718	469	392	718	825	29	38	1	0	0	1	0
4	524	634	192	113	634	502	30	84	0	0	0	0	0
5	286	558	42	18	558	283	31	30	0	0	0	0	0
...

Рассмотрим пример решения ЛДУ в математическом калькуляторе по вариантам перемещения (объединения) зон «С-П», «Р-Т», «Р-Г» и «Р-3» транспортного узла «Р».

1. Зоны «С-П» и «Р-Т»: для промзоны «С-П» получен 8701 вариант решений уравнения зависимости параметров $1 \cdot a(i) + 6 \cdot b(i) + 4 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 1 \cdot e(i) + 8 \cdot f(i) = 58$; для промзоны «Р-Т» получен 4931 вариант решений уравнения $2 \cdot a(i) + 12 \cdot b(i) + 4 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 2 \cdot e(i) + 4 \cdot f(i) = 58$, где 58 — рассчитанный класс узла.

2. Зоны «Р-3» и «Р-Г»: для промзоны «Р-3» получено 5252 варианта решения уравнения $1 \cdot a(i) + 4 \cdot b(i) + 1 \cdot c(i) + 25 \cdot d(i) + 10 \cdot e(i) + 5 \cdot f(i) = 58$, для промзоны «Р-Г» получено 7783 варианта решения уравнения $1 \cdot a(i) + 9 \cdot b(i) + 2 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 2 \cdot e(i) + 6 \cdot f(i) = 58$.

Количество вариантов решений, при которых значения параметров у коэффициентов ЛДУ зон принимают значения «0», «1», «2» и т. д. до «58», сведено в табл. 3–6.

Формирование и использование массивов данных ГКА ТУ

А. Оценка результатов параметров при решении ЛДУ при размещении основных зон

Для оценки массива данных значений ЛДУ основных зон построены диаграммы Парето, из которых следует, что маловажными являются, например, для зоны «С-П» значения параметров $d(i)$ (4584 значения «0») и $b(i)$ (3070 значений «0»), а оказывающими влияние на компоновку — значения $a(i)$, $c(i)$, $e(i)$ и $f(i)$. Дальнейшими исследованиями предусматривается оценка совместного влияния параметров зон.

Следующий шаг — формирование и использование массивов данных при оценке новых параметров размещения объектов транспортного узла (выполнено в табличном процессоре *MS Excel* по правилу «20/80»). В качестве примера на рис. 3 синим цветом выделено такое количество решений (ячеек), при которых накопленная сумма эффективных результатов была равна 80 %; красным цветом выделяется ячейка с неважными значениями «0», количество которых не влияет на качество решений (иногда дан-

	накопле		накопле		накопле		накопле		накопле		накопле		накопле					
	a(i)	%	b(i)	%	c(i)	%	d(i)	%	e(i)	%	d(i)	%	накоплен					
0	627	12,7	12,7	2907	59,0	59,0	1201	24,4	24,4	2550	51,7	51,7	627	12,7	12,7	217	4,4	4,4
1	574	11,6	11,6	1040	21,1	80,0	956	19,4	43,7	1375	27,9	79,6	574	11,6	11,6	956	19,4	23,8
2	500	10,1	21,8	515	10,4		750	15,2	59,0	20	0,4	80,0	500	10,1	21,8	750	15,2	39,0
3	456	9,2	31,0	144	2,9		579	11,7	70,7	264	5,4		456	9,2	31,0	579	11,7	50,7
4	393	8,0	39,0	21	0,4		439	8,9	79,6	78	1,6		393	8,0	39,0	439	8,9	59,6
5	357	7,2	46,2	0	0,0		20	0,4	80,0	14	0,3		357	7,2	46,2	326	6,6	66,3
6	304	6,2	52,4	0			236	4,8		0			304	6,2	52,4	236	4,8	71,0
7	275	5,6	58,0	0			166	3,4		0			275	5,6	58,0	166	3,4	74,4
8	231	4,7	62,7	0			113	2,3		0			231	4,7	62,7	113	2,3	76,7
9	208	4,2	66,9	0			73	1,5		0			208	4,2	66,9	73	1,5	78,2
10	172	3,5	70,4	0			45	0,9		0			172	3,5	70,4	45	0,9	79,1
11	154	3,1	73,5	0			26	0,5		0			154	3,1	73,5	26	0,5	79,6
12	125	2,5	76,0	0			13	0,3		0			125	2,5	76,0	13	0,3	79,9
13	111	2,3	78,3	0			6	0,1		0			111	2,3	78,3	6	0,1	80,0
14	83	1,7	80,0	0			2	0,0		0			83	1,7	80,0	2	0,0	80,0

Рис. 3. Модификация массива данных решений зоны «Р-Т»

ная процедура возможна частично, т. е. используется доля количества неважных «0» согласно условиям проектирования). Таким образом, существенно сокращается интервал решений для параметров зон «С-П» ($a(i) \in [1, 23]$, $b(i) \in [0, 3]$, при этом количество решений со значением «3» уменьшается на 601 ед., $f(i) \in [0, 6]$, при этом количество значений «0» сокращается на 1734 ед.) и «Р-Т» ($a(i) \in [1, 14]$, $b(i) \in [0, 1]$, $f(i) \in [0, 14]$, при этом количество значений «0» сокращается на 984 ед.)

На основе модифицированных результатов производится расчет рационального варианта решения

по методу центра тяжести $X = \frac{\sum_0^n a_i b_i}{\sum b_i}$. Например, для параметра $c(i)$ (рис. 7) зоны «Р-Т»:

$$X_{P-T}^{\hat{a}} = \frac{\sum_0^5 a_i \cdot b_i}{\sum b_i} = \frac{1201 \cdot 0 + 956 \cdot 1 + 750 \cdot 2 + 579 \cdot 3 + 439 \cdot 4 + 20 \cdot 5}{1201 + 956 + 750 + 579 + 439 + 20} = 1,53.$$

Таким образом, анализируя массивы параметров зон, получено:

– для зоны «С-П» имеем средневзвешенное значение $a(i)$ и $e(i)$ — 9,12 (округляем в большую сторону и получаем 10), для $b(i)$ (0;3) — $0,86 \approx 1$, для $c(i) \in (0;4)$ — $1,66 \approx 2$, для $d(i) \in (0;1)$ — $0,34 \approx 1$, для $f(i) \in (0;6)$ — $1,3 \approx 2$. Подставляя значения в ЛДУ зоны, получим:

$$1 \cdot a(i) + 6 \cdot b(i) + 4 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 1 \cdot e(i) + 8 \cdot f(i) = 1 \cdot 10 + 6 \cdot 1 + 4 \cdot 2 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 10 + 8 \cdot 2 = 60.$$

Разница с исходным ЛДУ составляет 2.

– для зоны «Р-Т» имеем средневзвешенное значение для $a(i)$ и $e(i)$ — 5,39 (округляем в большую сторону и получаем 6), для $b(i) \in (0;1)$ — $0,3 \approx 1$, для $c(i) \in (0;5)$ — $1,53 \approx 2$, для $d(i) \in (0;2)$ — $0,36 \approx 1$, для $f(i) \in (0;14)$ — $3,22 \approx 4$. Подставляя значения в ЛДУ зоны, получим:

$$2 \cdot a(i) + 12 \cdot b(i) + 4 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 2 \cdot e(i) + 4 \cdot f(i) = 1 \cdot 6 + 6 \cdot 1 + 4 \cdot 2 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 6 + 8 \cdot 4 = 68.$$

Разница с исходным ЛДУ составляет 10.

– для зоны «Р-3» имеем средневзвешенное значение для $a(i)$ и $c(i)$ — 9,74 (округляем в большую сторону и получаем 10), для $b(i) \in (0;17)$ — $3,41 \approx 4$, для $d(i) \in (0;2)$ — $0,18 \approx 1$, для $e(i) \in (0;5)$ — $1,41 \approx 2$, для $f(i) \in (0;11)$ — $2,61 \approx 3$. Подставляя значения в ЛДУ зоны, получим:

$$1 \cdot a(i) + 4 \cdot b(i) + 1 \cdot c(i) + 25 \cdot d(i) + 10 \cdot e(i) + 5 \cdot f(i) = 1 \cdot 10 + 4 \cdot 4 + 1 \cdot 10 + 25 \cdot 1 + 10 \cdot 2 + 5 \cdot 3 = 96.$$

Разница с исходным ЛДУ составляет 38.

$$\left(\begin{array}{l} X.-P1:10|1,2,1,10,2 X.-P2:6|1,2,1,6,4 X.-\Pi(1,2):10,1,2,1,6,4 \text{ or } 6,1,2,1,10,2; \\ X.-P1:10,1|2,1,10,2 X.-P2:6,1|2,1,6,4 X.-\Pi(1,2):10,1,2,1,6,4 \text{ or } 6,1,2,1,10,2; \\ X.-P1:10,1,2|1,10,2 X.-P2:6,1,2|1,6,4 X.-\Pi(1,2):10,1,2,1,6,4 \text{ or } 6,1,2,1,10,2; \\ X.-P1:10,1,2,1|10,2 X.-P2:6,1,2,1|6,4 X.-\Pi(1,2):10,1,2,1,6,4 \text{ or } 6,1,2,1,10,2; \\ X.-P1:10,1,2,1,10|2 X.-P2:6,1,2,1,6|4 X.-\Pi(1,2):10,1,2,1,10,4 \text{ or } 6,1,2,1,6,2; \end{array} \right)$$

Рис. 4

– для зоны «Р-Г» имеем средневзвешенное значение для $a(i)$ — 3,2 (округляем в большую сторону и получаем 4), для $b(i) \in (0;6)$ — $1,09 \approx 2$, для $c(i)$ и $e(i) \in (0;14)$ — $5,35 \approx 6$, для $d(i) \in (0;5)$ — $0,95 \approx 1$, для $f(i) \in (0;9)$ — $1,92 \approx 2$. Подставляя значения в ЛДУ зоны, получим:

$$1 \cdot a(i) + 9 \cdot b(i) + 2 \cdot c(i) + 10 \cdot d(i) + 2 \cdot e(i) + 6 \cdot f(i) = 1 \cdot 4 + 9 \cdot 2 + 2 \cdot 6 + 10 \cdot 1 + 2 \cdot 6 + 6 \cdot 2 = 74.$$

Разница с исходным ЛДУ составляет 16.

Для сортировки значений решений ЛДУ зон ТУ разработана авторская программа в среде *Python*. При сортировке 8701 решения ЛДУ зоны «С-П» по критериям: $a(i)$ и $e(i) = 10$ и $f(i) > 0$ получено 14 рациональных решений. Затем выполнена сортировка для 4931 результата ЛДУ зоны «Р-Т» по критериям $a(i)$ и $e(i) = 6$ и $f(i) > 0$. Получено 10 рациональных решений. Сортировка для 5252 результатов ЛДУ зоны «Р-З» по критериям $a(i) = 10$, $e(i) = 2$ и $f(i) > 0$ — получено 19 рациональных решений, для 7783 результатов ЛДУ зоны «Р-Г» по критериям $a(i) = 4$, $e(i) = 6$, $f(i) > 0$, $c(i) > 0$ — получено 20 рациональных решений.

Далее определяются коэффициенты выживаемости зон-«потомков» на основе результатов решений ЛДУ и отклонений от исходных ЛДУ. Результаты с максимальными отклонениями отбрасываются, и выполняется следующий цикл формирования массивов данных для новой зоны (зон).

Б. Оценка параметров результатов решения ЛДУ зон-«потомков» при объединении/модификации исходных зон

Вариант решения ЛДУ с меньшим отклонением имеет наибольшую вероятность выбора, и набор параметров («хромосом») исходной транспортной зоны «С-П» (P1) является предпочтительней, чем у «Р-Т» (P2). Новая транспортная зона («потомок») содержит информацию о параметрах зон — «родителей». Расположение разделительной линии («кроссинговера») может определяться стратегией переустройства транспортного узла и будущего преобладания желаемых параметров (набора «ген» в «хромосомах»). Пример для выбора параметров новой зоны, полученной в результате объединения/модификации существующих зон «С-П» и «Р-Т» узла «Р», представлен на рис. 4.

$$\text{Уравнение № 1 — } 10 \cdot T(i) + 1 \cdot L(i) + 2 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 4 \cdot P(i) = 58.$$

Решений — 28 428.

$$\text{Уравнение № 2 — } 6 \cdot T(i) + 1 \cdot L(i) + 2 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 10 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58.$$

Решений — 52 977.

$$\text{Уравнение № 3 — } 10 \cdot T(i) + 1 \cdot L(i) + 2 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 10 \cdot A(i) + 4 \cdot P(i) = 58.$$

Решений — 19 400.

$$\left(\begin{array}{l} X. - P1 : 10 | 4, 10, 1, 2, 3 X. - P2 : 4 | 2, 6, 1, 6, 2 X. - \Pi(1, 2) : 10, 2, 6, 1, 6, 2 \text{ or } 4, 4, 10, 1, 2, 3; \\ X. - P1 : 10, 4 | 10, 1, 2, 3 X. - P2 : 4, 2 | 6, 1, 6, 2 X. - \Pi(1, 2) : 10, 4, 6, 1, 6, 2 \text{ or } 4, 2, 10, 1, 2, 3; \\ X. - P1 : 10, 4, 10 | 1, 2, 3 X. - P2 : 4, 2, 6 | 1, 6, 2 X. - \Pi(1, 2) : 10, 4, 10, 1, 6, 2 \text{ or } 4, 2, 6, 1, 2, 3; \\ X. - P1 : 10, 4, 10, 1 | 2, 3 X. - P2 : 4, 2, 6, 1 | 6, 2 X. - \Pi(1, 2) : 10, 4, 10, 1, 6, 2 \text{ or } 4, 2, 6, 1, 2, 3; \\ X. - P1 : 10, 4, 10, 1, 2 | 3 X. - P2 : 4, 2, 6, 1, 6 | 2 X. - \Pi(1, 2) : 10, 4, 10, 1, 2, 2 \text{ or } 4, 2, 6, 1, 6, 3; \end{array} \right)$$

Рис. 5

Уравнение № 4 — $6 \cdot T(i) + 1 \cdot L(i) + 2 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 75 239.

Пример выбора параметров новой зоны, полученной в результате модификации зон «Р-З» и «Р-Г» узла «Р», представлен на рис. 5.

Уравнение № 1 — $10 \cdot T(i) + 2 \cdot L(i) + 6 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 10 867.

Уравнение № 2 — $4 \cdot T(i) + 4 \cdot L(i) + 10 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 2 \cdot A(i) + 3 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 14 272.

Уравнение № 3 — $10 \cdot T(i) + 4 \cdot L(i) + 6 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 5815.

Уравнение № 4 — $4 \cdot T(i) + 2 \cdot L(i) + 10 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 2 \cdot A(i) + 3 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 26 604.

Уравнение № 5 — $10 \cdot T(i) + 4 \cdot L(i) + 10 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 3961.

Уравнение № 6 — $4 \cdot T(i) + 2 \cdot L(i) + 6 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 2 \cdot A(i) + 3 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 38 689.

Уравнение № 7 — $10 \cdot T(i) + 4 \cdot L(i) + 10 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 2 \cdot A(i) + 2 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 10 414.

Уравнение № 8 — $4 \cdot T(i) + 2 \cdot L(i) + 6 \cdot B(i) + 1 \cdot S(i) + 6 \cdot A(i) + 3 \cdot P(i) = 58$.

Решений — 14 863.

Количество решений ЛДУ зон-«потомков» для исходных зон «С-П» и «Р-Т» (4 уравнения), а также ЛДУ зон-«потомков» для исходных зон «Р-З» и «Р-Г» (8 уравнений) определяется в табличных формах аналогично вышеприведенной методике. Таким же образом производится сужение области допустимых решений согласно правилу Парето.

Выбор значений параметров зон-«потомков» по принципу центра тяжести выполняется программным способом в табличной форме. Примеры для ЛДУ № 1 зон-«родителей» «С-П» и «Р-Т», а также для ЛДУ № 1 зон — «родителей» «Р-З» и «Р-Г» представлены на рис. 6.

Подставляя полученные значения, округленные в большую сторону, в ЛДУ зон-«потомков» «С-П» и «Р-Т», получим:

Уравнение № 1 — $10 \cdot 1 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 1 \cdot 9 + 6 \cdot 2 + 4 \cdot 3 = 10 + 9 + 16 + 9 + 12 + 12 = 68$.

Разница по модулю — 10.

Уравнение № 2 — $6 \cdot 2 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 1 \cdot 9 + 10 \cdot 1 + 2 \cdot 6 = 12 + 9 + 12 + 9 + 10 + 12 = 62$.

Разница по модулю — 6.

Для уравнения № 1 («С-П» и «Р-Т»)

	T	L	B	S	P	
0	9728	2050	3874	2050	4680	1620
1	7875	1824	3441	1824	7099	5729
2	3514	1824	3045	1824	4675	4415
3	1275	1617	2684	1617	2930	3341
4	325	1617	2356	1617	1725	2475
5	39	1428	2059	1428	935	1789
6	0,89	1428	1791	1428	452	1256
7		1256	1550	1256	185	851
8		1256	1334	1256	57	553
9		1100	1141	1100	1,81	340
10		1100	970	1100		195
11		959	819	959		102
12		959	686	959		46
13		832	570	832		17
14		832	300	832		4
15		718	5,20	718		3,00
16		718		718		
17		616		616		
18		616		616		
19		525		525		
20		525		525		
21		445		445		
22		445		445		
23		100		100		
22756		8,90		8,90		

Для уравнения № 1 («Р-З» и «Р-Г»)

	T	L	B	S	A	P
0	3600	1443	1700	1443	1700	1443
1	3015	1287	2684	0	2684	1287
2	1386	1144	1791	1287	1791	1144
3	525	1010	1141	0	1141	1010
4	145	891	686	1144	686	891
5	21	783	382	0	382	783
6	0,93	682	192	1010	192	682
7		594	83	0	83	594
8		515	28	891	28	515
9		441	6	0	6	441
10		378	1,88	783	1,88	378
11		322		0		322
12		270		682		270
13		227		0		227
14		155		594		155
15		5,30		0		5,30
16				515		
17				0		
18				441		
19				0		
20				378		
21				0		
22				322		
23				0		
24				270		
25				0		
26				227		
27				0		
28				150		
8692				10,59		

Рис. 6. Выбор значений параметров ЛДУ зон-«потомков»

Уравнение № 3 — $10 \cdot 1 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 1 \cdot 9 + 10 \cdot 1 + 4 \cdot 4 = 10 + 9 + 12 + 9 + 10 + 16 = 66$.

Разница по модулю — 8.

Уравнение № 4 — $6 \cdot 2 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 1 \cdot 9 + 6 \cdot 2 + 2 \cdot 6 = 12 + 9 + 12 + 9 + 12 + 12 = 66$.

Разница по модулю — 8.

Наименьшая разница по модулю у уравнения 2. Выполним сортировку по параметрам $T = 2, P = 6, A = 1, B = 6, (L, S) > 0$. В результате получена ведомость данных из пятнадцати рациональных решений (рис. 7, а). Наиболее близкие корни для решения уравнения: $T = 2, L = 8, B = 6, S = 8, A = 1, P = 6$. Подставляя полученные значения, округленные в большую сторону, в ЛДУ зон-«потомков» «Р-З» и «Р-Г», получим:

Уравнение 1 — $10 \cdot 1 + 2 \cdot 6 + 6 \cdot 2 + 1 \cdot 11 + 6 \cdot 2 + 2 \cdot 6 = 10 + 12 + 12 + 11 + 12 + 12 = 69$.

Разница по модулю — 11.

Уравнение 2 — $4 \cdot 4 + 4 \cdot 4 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 3 \cdot 5 = 16 + 16 + 10 + 9 + 12 + 15 = 78$.

Разница по модулю — 20.

Уравнение 3 — $10 \cdot 1 + 4 \cdot 4 + 6 \cdot 2 + 1 \cdot 11 + 6 \cdot 2 + 2 \cdot 6 = 10 + 16 + 12 + 11 + 12 + 12 = 73$.

Разница по модулю — 15.

Уравнение 4 — $4 \cdot 3 + 2 \cdot 5 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 9 + 2 \cdot 6 + 3 \cdot 5 = 12 + 10 + 10 + 9 + 12 + 15 = 68$.

Разница по модулю — 10.

Уравнение 5 — $10 \cdot 1 + 4 \cdot 4 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 11 + 6 \cdot 2 + 2 \cdot 6 = 10 + 16 + 10 + 11 + 12 + 12 = 71$.

Разница по модулю — 13.

Уравнение 6 — $4 \cdot 3 + 2 \cdot 6 + 6 \cdot 2 + 1 \cdot 11 + 2 \cdot 6 + 3 \cdot 5 = 12 + 12 + 12 + 11 + 12 + 15 = 71$.

Разница по модулю — 16.

<i>T</i>	<i>L</i>	<i>B</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>P</i>
2	1	6	15	1	6
2	2	6	14	1	6
2	3	6	13	1	6
2	4	6	12	1	6
2	5	6	11	1	6
2	6	6	10	1	6
2	7	6	9	1	6
2	8	6	8	1	6
2	9	6	7	1	6
2	10	6	6	1	6
2	11	6	5	1	6
2	12	6	4	1	6
2	13	6	3	1	6
2	14	6	2	1	6
2	15	6	1	1	6

<i>T</i>	<i>L</i>	<i>B</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>P</i>
3	4	1	1	6	5
3	3	1	3	6	5
3	2	1	5	6	5
3	1	1	7	6	5

Рис. 7. Сортировка результатов решений ЛДУ зон-«потомков» по принципу минимального расхождения

Уравнение 7 — $10 \cdot 1 + 4 \cdot 4 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 11 + 2 \cdot 6 + 2 \cdot 6 = 10 + 16 + 10 + 11 + 12 + 12 = 71$.

Разница по модулю — 16.

Уравнение 8 — $4 \cdot 3 + 2 \cdot 6 + 6 \cdot 2 + 1 \cdot 9 + 6 \cdot 2 + 3 \cdot 5 = 12 + 12 + 12 + 9 + 12 + 15 = 72$.

Разница по модулю — 14.

Наименьшая разница по модулю у уравнения 4. Выполним сортировку по параметрам $T=3, P=5, A=6, (L, B, S) > 0$. В результате получена ведомость данных из четырех рациональных решений (рис. 7, б). Наиболее близкие корни для решения уравнения: $T=3, L=1, B=1, S=7, A=6, P=5$.

Обработка показателей и выводы

В результате формируются сводные таблицы параметров в безразмерной форме для исходных зон и зоны-«потомка»:

– для зоны-«потомка» зон «С-П» и «Р-Т»

Зоны ТУ	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>B</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>P</i>
«С-П»	1	6	4	10	1	8
«Р-Т»	2	12	4	10	2	4
Потомок № 2	2	8	6	8	1	6

– для зоны-«потомка» зон «Р-З» и «Р-Г»

Зоны ТУ	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>B</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>P</i>
«Р-З»	1	4	1	25	10	5
«Р-Г»	1	9	2	10	2	6
Потомок № 4	2	1	1	7	6	5

Возвращаются значения параметров зон в исходном виде:

– для зоны-«потомка» зон «С-П» и «Р-Т»

Зоны узла	Количество видов транспорта, <i>T</i>	Длина, <i>L</i> , ед.	Ширина, <i>B</i> , ед.	Площадь, <i>S</i> , ед. ²	Население, <i>A</i> , тыс. чел.	Показатель, <i>P</i>
«С-П»	3	28	18,2	533	12	8
«Р-Т»	4	30,7	8,7	267,1	≈ 9	4
Потомок № 2	4	26,1	20,2	320	≈ 7	6

– для зоны-«потомка» зон «Р-З» и «Р-Г»

Зона узла	Количество видов транспорта, T	Длина, L , ед.	Ширина, B , ед.	Площадь, S , ед. ²	Население, A , тыс. чел.	Показатель, P
«Р-З»	3	60,3	10,5	480,4	2	5
«Р-Г»	4	29,7	10	288,9	15	6
Потомок № 4	4	6,9	6,8	93,9	≈ 8,5	5

Далее формируется ведомость показателей транспортного узла после выполненных перестановок и модификаций зон. Например, расчет некоторых из них дал результаты:

– плотность транспортной сети узла $\delta = \frac{L_c}{S_3}$, где L_c — протяженность транспортной сети, км;

S_3 — площадь застроенной территории узла. Для существующего варианта значение составило 0,135 при $L = 211,59$ км, $S = 1569,4$ км², для проектного — 0,511 при $L = 211,59$ км, $S = 413,9$ км²;

– коэффициент Энгеля [9] $d = \frac{L}{\sqrt{SH}}$, где L — общая длина транспортных путей, S — площадь

территории, H — численность населения. Для существующего варианта значение составило 0,866 при $L = 211,59$ км, $S = 1569,4$ км², $H = 38$ тыс. чел., для проектного — 2,642 при $L = 211,59$ км, $S = 413,9$ км², $H = 15,5$ тыс. чел.;

– коэффициент дивергенции узла составил CD (« $P_{\text{сущ}}$ ») = 0,07008, CD (« $P_{\text{пр}}$ ») = 0,06604, т. е. за счет выполненной концентрации инфраструктурных объектов и технологических операций узловая система стала менее однородной, но снизилась нагрузка на центр города, пассажиро- и грузопотоки движутся по менее загруженным транспортным связям.

Таким образом, представленная разработка методики ГКА ТУ при дальнейшей программной реализации и многовариантной апробации выбора вариантов узловых компоновочных решений позволит выполнять предварительный анализ возможных стратегий развития зон ТУ.

Список источников

1. Transport of Russia: All-Russian transport weekly information and analytical newspaper. — URL: <http://www.transportrussia.ru> (дата обращения: 22.05.2024).

2. Северо-Кавказская железная дорога. — URL: <http://skzdservice.ru/page/4> (дата обращения: 22.05.2024).

3. Солодкий А. И. Развитие интеллектуальных транспортных систем в России: проблемы и пути их решения. Новый этап / А. И. Солодкий // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2020. — № 6. — С. 10–19. — DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10.

4. Pankratov I. A. Genetic algorithm of energy consumption optimization for reorientation of the spacecraft orbital plane / I. A. Pankratov // Mechatronics, automation,

control. — 2022. — Vol. 23. — Iss. 5. — Pp. 256–262. — DOI: 10.17587/mau.23.256-262.

5. Lyabakh N. Development of the pattern recognition theory for solving the tasks of object classification and yard processes / N. Lyabakh, A. Saryan, I. Dergacheva et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2020. — Pp. 59–68. — DOI: 10.1007/978-3-030-51974-2_6.

6. Числов О. Н. Принципы формирования комплексного критерия оценки структуры транспортного узла / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 1(93). — С. 122–131. — DOI: 10.46973/0201-727X_2024_1_122.

7. Числов О. Н. Методы цифровизации и интеллектуализации параметров логистического взаимодействия в системе «ж.-д. станция — порт» в условиях мультиагентности транспортно-технологических процессов: монография / О. Н. Числов, М. В. Колесников, В. М. Задорожний и др.; ФГБОУ ВО РГУПС; АНО ВО НТУ «Сириус». — Ростов-на-Дону: РГУПС, 2022. — 396 с.

8. Zakharov I. V. The choice of structures of heterogeneous information-computer systems based on the apparatus of genetic algorithms / I. V. Zakharov, A. O. Shushakov, S. S. Zyкова // *Intelligent Technologies on Transport*. — 2022. — Iss. 3(31). — Pp. 46–51. — DOI 10.24412/2413-2527-2022-331-46-51.

9. Лебедева Н. А. Оценка транспортной обеспеченности северо-западного федерального округа / Н. А. Лебе-

дева // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». — 2021. — № 2. — С. 47–54 — DOI: 10.17586/2310-1172-2021-14-2-47-54.

Дата поступления: 04.11.2024

Решение о публикации: 10.02.2025

Контактная информация:

ЧИСЛОВ Олег Николаевич — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой; o_chislov@mail.ru

МИЗГИРЕВА Екатерина Евгеньевна — специалист; brutald@yandex.ru

ЛУГАНЧЕНКО Никита Максимович — аспирант;

luganchenko.n@yandex.ru

Genetic Layout Algorithm for Placing Transport Hub Objects (GLA TH): Problem Statement, Formation and Use of Data Sets, Solution Methods

O. N. Chislov, E. E. Mizgireva, N. M. Luganchenko

Rostov State Transport University (RSTU), 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Chislov O. N., Mizgireva E. E., Luganchenko N. M. Genetic Layout Algorithm for Placing Transport Hub Objects (GLA TH): Problem Statement, Formation and Use of Data Sets, Solution Methods // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 32–46. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-32-46

Summary

Purpose: To formulate the principles of a genetic layout algorithm for planning transport hub facilities placement and those of data use and processing. **Methods:** Based on the analysis of the relevant scientific papers, the genetic algorithm method and the author-developed linear Diophantine equations in the parameterization of the node zones considered in the formulation of layout problems are applied. **Results:** The authors have developed an application method for placing transport hub objects in the context of unclear direction of research, data sets formation and their evaluation and rational options using the Pareto method and the authors' genetic layout algorithm. The potential adaptation of hub zones transport specifications to prospective digitalized and intellectualized infrastructure and technology collaboration has been investigated. **Practical significance:** The authors' solution for an applied problem and big data set formation, evaluation and choosing rational options using the Pareto method and a genetic layout algorithm on the example of hub zones is presented. The efficiency is obtained through improved transport links, optimized zone parameters, and higher hub rating.

Keywords: Transport hub, hub zones, transport operation parameters, mathematical modeling, genetic layout algorithm, linear Diophantine equations, Pareto method, big data sets.

References

1. Transport of Russia: All-Russian transport weekly information and analytical newspaper. Available at: <http://www.transporthussia.ru> (accessed: May 22, 2024).
2. Severo-Kavkazskaya zheleznaya doroga [North Caucasian Railway]. Available at: <http://skzdservice.ru/page/4> (accessed: May 22, 2024). (In Russian)
3. Solodkiy A. I. Razvitiye intellektual'nykh transportnykh sistem v Rossii: problemy i puti ikh resheniya. Novyy etap [Development of intelligent transport systems in Russia: problems and solutions. New stage]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intelligence. Innovations. Investments]. 2020, Iss. 6, pp. 10–19. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10. (In Russian)
4. Pankratov I. A. Genetic algorithm of energy consumption optimization for reorientation of the spacecraft orbital plane. *Mechatronics, automation, control*, 2022, vol. 23, Iss. 5, pp. 256–262. DOI: 10.17587/mau.23.256-262.
5. Lyabakh N., Saryan A., Dergacheva I. et al. Development of the pattern recognition theory for solving the tasks of object classification and yard processes. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, pp. 59–68. DOI: 10.1007/978-3-030-51974-2_6.
6. Chislov O. N., Mizgireva E. E. Printsipy formirovaniya kompleksnogo kriteriya otsenki struktury transportnogo uzla [Principles of Formation of a Comprehensive Criterion for Assessing the Structure of a Transport Hub]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering]. 2024, Iss. 1(93), pp. 122–131. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_1_122. (In Russian)
7. Chislov O. N., Kolesnikov M. V, Zadorozhniy V. M. et al. *Metody tsifrovizatsii i intellektualizatsii parametrov logisticheskogo vzaimodeystviya v sisteme “zh.-d. stantsiya — port” v usloviyakh mul'tiagentnosti transportno-tekhnologicheskikh protsessov: monografiya*. FGBOU VO RGUPS; ANO VO NTU “Sirius” [Methods of Digitalization and Intellectualization of Parameters of Logistics Interaction in the Railway Station — Port System in the Context of Multi-Agency Transport and Technological Processes: Monograph. FGBOU VO RGUPS; ANO VO NTU “Sirius”]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2022, 396 p. (In Russian)
8. Zakharov I. V., Shushakov A. O., Zykova S. S. The choice of structures of heterogeneous information-computer systems based on the apparatus of genetic algorithms. *Intelligent Technologies on Transport*. 2022, Iss. 3(31), pp. 46–51. DOI: 10.24412/2413-2527-2022-331-46-51.
9. Lebedeva N. A. Otsenka transportnoy obespechennosti severo-zapadnogo federal'nogo okruga [Assessment of transport provision of the North-West Federal District]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya “Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment”* [Scientific journal of NRU ITMO. Series “Economics and environmental management”]. 2021, Iss. 2, pp. 47–54. DOI: 10.17586/2310-1172-2021-14-2-47-54. (In Russian)

Received: November 04, 2024

Accepted: February 10, 2025

Author's information:

Oleg N. CHISLOV — Dr. Sci. of Engineering, Professor, Head of the Department; o_chislov@mail.ru

Ekaterina E. MIZGIREVA — Specialist; brutald@yandex.ru

Nikita M. LUGANCHENKO — Postgraduate Student; luganchenko.n@yandex.ru