

УДК 519.8

doi: 10.53816/23061456\_2025\_1–2\_15

**ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ  
К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**GENETIC ALGORITHM FOR SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS  
TO THE CHARACTERISTICS OF TECHNICAL SYSTEMS**

*Канд. техн. наук А.Е. Привалов, канд. воен. наук П.Ю. Бугайченко,  
канд. техн. наук М.А. Александров*

*Ph.D. A.E. Privalov, Ph.D. P.Yu. Bugaichenko, Ph.D. M.A. Aleksandrov*

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского*

В статье предлагается генетический алгоритм обоснования требований к характеристикам сложных технических систем, основанный на алгоритме многокритериальной оптимизации SPEA2. Базовый алгоритм модифицирован для решения обратной задачи параметрического синтеза. Для обеспечения равномерности получаемого фронта Парето используется подход, основанный на методе кластеризации *k*-means, сущность которого заключается в объединении нескольких близко расположенных решений в один кластер с последующей заменой их одним решением, расположенным в центре кластера. В статье приводится численный пример обоснования характеристик многоспутниковой орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли. Предлагаемый алгоритм может быть использован на этапе разработки технического задания на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию сложных технических систем при оформлении раздела «Технические требования к изделию».

**Ключевые слова:** сложная техническая система, генетический алгоритм, фронт Парето, технические требования, техническое задание.

The article proposes a genetic algorithm for substantiating requirements for the characteristics of complex technical systems, based on the multicriteria optimization algorithm SPEA2. The basic algorithm is modified to solve the inverse problem of parametric synthesis. To ensure the uniformity of the resulting Pareto front, an approach is used based on the *k*-means clustering method, the essence of which is to combine several closely located solutions into one cluster and then replace them with one solution located in the center of the cluster. The article provides a numerical example of substantiating the characteristics of a multi-satellite orbital constellation for remote sensing of the Earth. The proposed algorithm can be used at the stage of developing technical specifications for carrying out research and development work to create complex technical systems when preparing the section «Technical requirements for the product».

**Keywords:** complex technical system, genetic algorithm, Pareto front, technical requirements, technical task.

## Введение

Одной из важнейших задач, возникающих при разработке технических заданий на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке сложных технических систем (СТС), является разработка раздела «Технические требования к изделию», в который входят характеристики (параметры), обеспечивающие выполнение изделием своих функций в заданных условиях применения, технические характеристики (параметры) изделия, обеспечивающие выполнение возложенных на него задач, вероятностно-временные и другие характеристики и показатели, определяющие целевое использование создаваемого изделия, а также требования к стойкости, надежности и другим эксплуатационно-техническим характеристикам [1]. Числовые значения этих характеристик обуславливаются особенностями применения СТС и определяются в процессе внешнего проектирования, в ходе которого выявляются показатели и критерии качества (эффективности функционирования) СТС, разрабатывается агрегированная модель и выполняется параметрический синтез СТС. Результатом последнего являются числовые значения требований к СТС и процессу ее функционирования, обеспечивающие выполнение критериев, названных выше [2]. Следует отметить следующие особенности внешнего проектирования современных СТС.

1. Показатель качества (эффективности функционирования) СТС, как правило, является векторным, а задача оценивания качества (эффективности) — многокритериальной. В связи с этим, решением задачи параметрического синтеза является множество векторов значений характеристик, обладающих одинаковым качеством (множество Парето).

2. Агрегированные модели СТС, построенные с использованием современных методов моделирования систем, являются сложными нелинейными объектами. В связи с этим, известные методы исследования операций зачастую неприменимы из-за высокой размерности задачи и нелинейности модели. В связи с этим, для решения задач исследования агрегированных моделей СТС применяются различного рода эвристические алгоритмы.

В статье предлагается подход к обоснованию требований к СТС, основанный на генетическом алгоритме SPEA2. Оригинальный алгоритм, опубликованный в [3], был модифицирован для решения обратной задачи параметрического синтеза, а также дополнен алгоритмом фильтрации популяции, основанным на методе кластеризации  $k$ -means, который обеспечивает равномерность фронта Парето.

## Постановка задачи

Пусть определены:

1. Множество характеристик СТС:

$$S = \{s_l | l = \overline{1, l}\};$$

2. Множество значений характеристик СТС:

$$R = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_l,$$

где  $R_l$  — множество значений  $l$ -й характеристики;

3. Множество значений показателей качества СТС (или эффективности процесса ее функционирования):

$$\Xi = \Xi_1 \times \Xi_2 \times \dots \times \Xi_q,$$

где  $\Xi_q | q = \overline{1, q}$  — множество значений  $q$ -го показателя;

4. Критерии оценивания качества (эффективности функционирования) СТС:

$$\Xi^* = \Xi_1^* \times \Xi_2^* \times \dots \times \Xi_q^*,$$

где  $\Xi_q^* \subset \Xi_q$  — критерий оценивания  $q$ -го показателя, представляющий собой множество требуемых заказчиком (или пользователем СТС) значений соответствующего показателя;

5. Агрегированная модель СТС, разработанная в ходе внешнего проектирования:

$$f: R \rightarrow \Xi;$$

6. Направления поиска характеристик:

$$h: S \rightarrow \{\min, \max\}.$$

Особенность постановки задачи состоит в том, что требуется найти ограничения

на значения характеристик (требование), выход за пределы которых приведет к несоблюдению критериев  $\mathcal{E}^*$ . Следовательно, направление поиска следует определять из условия, что необходимо найти совокупность «наихудших» значений характеристик, при которых выполняются ожидания заказчика. Например, если одна из характеристик  $s_i$  — прочность, то  $h(s_i) = \min$ , то есть необходимо найти минимальную прочность, при которой выполняются критерии  $\mathcal{E}^*$ .

Вектор характеристик  $r_j$  превосходит по Парето (доминирует) вектор  $r_i$ ,  $r_j \succ r_i$  если существует характеристика, по которой  $r_j$  превосходит с учетом направления поиска  $r_i$ , а для остальных характеристик  $r_i$  не превосходит  $r_j$  [4]:

$$r_j \succ r_i \Rightarrow \exists l_1 \in \overline{1, l}: r_{j, l_1} \overset{h}{>} r_{i, l_1} \wedge r_{j, l_2} \overset{h}{\geq} r_{i, l_2}, \\ l_2 = \overline{1, l}, \quad l_2 \neq l_1.$$

Логический оператор «превосходит с учетом направления» определяется следующим образом:

$$r_{jl} \overset{h}{>} r_{il} \Leftarrow \begin{cases} r_{jl} > r_{il}, & \text{если } h(s_i) = \max \\ r_{jl} < r_{il} & \text{если } h(s_i) = \min \end{cases}.$$

Необходимо определить множество Парето-оптимальных векторов характеристик СТС (фронт Парето), для которых выполняются критерии  $\mathcal{E}^*$ :

$$R^* = \left\{ r^* : \left\{ \begin{array}{l} f(r^*) \in \mathcal{E}^* \\ \{r : r \succ r^*\} = \emptyset \end{array} \right. \middle| r, r^* \in R^{\text{УЦД}} \right\}.$$

### Этапы генетического алгоритма

Предлагаемый алгоритм основан на известном генетическом алгоритме поиска Парето-оптимальных решений SPEA2 и состоит из семи этапов [3].

#### 1. Инициализация.

1.1. Определение размеров начальной популяции  $N$  и архива  $\bar{N}$ .

1.2. Генерирование начальной популяции  $W(t=0)$  и архива  $\bar{W}(t=0) = \emptyset$  (здесь  $t$  — номер шага алгоритма):

$$W(t=0) = \{\tilde{r} \mid \tilde{r} \in R \wedge f(\tilde{r}) \in \mathcal{E}^*\}.$$

2. Расчет параметров пригодности (фитнесс-функции) для каждого элемента (особи) множеств (решения)  $W(t)$  и  $\bar{W}(t)$ .

2.1. Расчет «силы» решения — количества решений из множеств  $W(t)$  и  $\bar{W}(t)$ , которые она доминирует:

$$\text{power}(r_i) = \\ = \text{card}\left(\left\{r_j \mid r_j \in W(t) \cup \bar{W}(t) \wedge r_i \succ r_j\right\}\right).$$

2.2. Расчет «слабости» — суммарная сила всех решений, доминирующих данное:

$$\text{weakness}(r_i) = \sum_{\substack{r_j \in W(t) \cup \bar{W}(t), \\ r_j \succ r_i}} \text{power}(r_j).$$

2.3. Расчет плотности решения:

$$\text{density}(r_i) = \frac{1}{f^\Delta(r_i, r_n) + 2},$$

где  $r_i, r_n$  — расстояние до  $n$ -го соседа (в [9] предложено  $n = \sqrt{N + \bar{N}}$ ),  $f^\Delta(r_i, r_n)$  — функция расстояния между объектами  $r_i$  и  $r_n$  в  $l$ -мерном пространстве. В качестве расстояния предлагается евклидово расстояние между точками в нормированном пространстве:

$$f^\Delta(r_i, r_n) = \sqrt{\sum_{l=1}^l \left( \frac{r_{jl} - r_{nl}}{r_l^{\max} - r_l^{\min}} \right)^2} \bigg| r_l^{\max} = \\ = \max R_l, r_l^{\min} = \min R_l.$$

2.4. Расчет фитнес-функции

$$\text{fitness}(r_i) = \text{density}(r_i) + \text{weakness}(r_i).$$

3. Отбор популяции.

3.1. Копирование всех недоминируемых решений (то есть тех, у которых фитнес-функция меньше 1) в архив следующего шага

$$\bar{W}(t+1) = \{r \mid r \in W(t) \cup \bar{W}(t) \wedge \text{fitness}(r) < 1\}.$$

3.2. Если количество недоминируемых решений совпадает с размером архива, то есть

$$\text{card}(\bar{W}(t+1)) = \bar{N},$$

то отбор популяции закончен (переход к п. 4).

3.3. Если количество недоминируемых решений мало:

$$\text{card}(\bar{W}(t+1)) < \bar{N},$$

то лучшие  $\bar{N} - \text{card}(\bar{W}(t+1))$  доминируемых решений из множества  $W(t) \cup \bar{W}(t)$  копируются в новый архив. Для этого множество доминируемых решений

$$\{w | w \in W(t) \cup \bar{W}(t) \wedge \text{fitness}(w) \geq 1\}$$

сортируется в соответствии с фитнес-функцией и копируются первые  $\bar{N} - \text{card}(\bar{W}(t+1))$  решений с  $\text{fitness}(W) \geq 1$  в  $\bar{W}(t+1)$ .

3.4. Если количество недоминируемых решений больше архива, запускается процедура фильтрации архива. Сущность фильтрации архива заключается в поиске наиболее близко расположенных решений, объединении их в кластер и замене всего множества решений центроидом данного кластера. В отличие от изначальной версии алгоритма [3], предлагается альтернативная процедура фильтрации с применением метода кластеризации  $k$ -means [5]. Применение данной процедуры обеспечивает равномерность фронта Парето и сходимость алгоритма.

3.4.1. Генерирование  $\bar{N}$  центров кластеров, в качестве которых используются первые  $\bar{N}$  недоминируемых решений, входящих в  $W(t) \cup \bar{W}(t)$ :

$$\bar{W}_{m=0} = \left\{ \begin{array}{l} \tilde{r}_i : \tilde{r}_i = r_i, i = \overline{1, \bar{N}}, \\ r_i \in W(t) \cup \bar{W}(t) \wedge \text{fitness}(r) < 1 \end{array} \right\},$$

где  $\tilde{r}_i$  — центр  $i$ -го кластера;

$m$  — номер шага кластеризации.

3.4.2. Отнесение всех недоминируемых решений множества  $W(t) \cup \bar{W}(t)$  к кластерам:

$$\left\{ \tilde{R}_i = \left\{ \begin{array}{l} r_j : j = \arg \min_j \left( f^A(r_j, \tilde{r}_i) \right) \\ r_j \in W(t) \cup \bar{W}(t) \wedge \text{fitness}(r) < 1 \end{array} \right\} \right\}.$$

3.4.3. Расчет новых центров кластеров

$$\bar{W}_{m+1} = \left\{ \tilde{r}_i = f^A(\tilde{R}_i) \right\},$$

где  $f^A(\tilde{R}_i)$  — функция расчета средних значений

$$f^A(\tilde{R}_i) = \left( \sum_{j=1}^{\text{card}(\tilde{R}_i)} r_{jl} / \text{card}(\tilde{R}_i) \right) \Big|_{l=\overline{1, L}}.$$

3.4.4. Вычисление признака остановки кластеризации

$$\bigwedge_{i=1}^{\bar{N}} \left( f^A(\tilde{r}_{i,m}, \tilde{r}_{i,m+1}) < \delta \right) \Big|_{\tilde{r}_{i,m} \in \bar{W}_m, \tilde{r}_{i,m+1} \in \bar{W}_{m+1}}.$$

3.4.5. Наполнение архива усредненными значениями (центрами кластеров)

$$\bar{W}(t+1) = \bar{W}.$$

4. Если не выполняется условие останова  $t > T^{STOP}$ , осуществляется переход к этапу 5, в противном случае — вывод искомого решения

$$R^* = \bar{W}(t+1).$$

5. Выбор потомков для размножения на основании метода случайного отбора из множества  $\bar{W}(t+1)$ .

6. Применение процедуры размножения и мутации. Закон мутации генов использовался следующий [6]:

$$\tilde{r}_{il} = r_{il} + (-1)^{\tilde{b}} (r_{il}^{\max} - r_{il}^{\min}) \cdot \sum_{k=1}^K \tilde{a} \cdot 2^{-k},$$

где  $K$  — положительное число (точность мутации);

$\tilde{a}$ ,  $\tilde{b}$  — вероятностные коэффициенты:

$$\tilde{a} = \begin{cases} 0, & \text{с вероятностью } (K-1)/K; \\ 1, & \text{с вероятностью } 1/K. \end{cases}$$

$$\tilde{b} = \begin{cases} 0, & \text{с вероятностью } 0,5; \\ 1, & \text{с вероятностью } 0,5. \end{cases}$$

7. Удаление неверных решений, то есть решений, для которых  $f(r) \notin \mathcal{E}^*$ . Повторение шага 6 для удаленных решений.

8. Помещение результирующей популяции в  $W(t+1)$ . Увеличение времени на единицу и переход к шагу 2.

### Результаты численных исследований генетического алгоритма

Рассмотрим пример применения генетического алгоритма для обоснования требований к характеристикам процесса управления многоспутниковой орбитальной группировкой (ОГ) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Пусть даны агрегированные характеристики ОГ, а также процесса ее применения (характеристики входного потока заявок на получение данных ДЗЗ и процесса контроля результатов выполнения заявок):

$$S^y = \{\lambda^x, \tau^x, I, \mu^y, \tau^y, p^y, \tau^F, \tau^Q, p^a, p^b\},$$

где  $\lambda^x$  — интенсивность входного потока заявок;  
 $\tau^x$  — требуемая оперативность выполнения заявки;

$I$  — количество космических аппаратов (КА) в ОГ;

$\mu^y$  — пропускная способность ОГ, среднее количество заявок, которое может выполнить ОГ в единицу времени;

$\tau^y$  — характеристика оперативности ОГ, средняя длительность выполнения заявки (без учета загруженности ОГ);

$p^y$  — вероятность получения требуемой информации при условии выполнения заявки ОГ;

$\tau^F$  — среднее время возникновения нештатной ситуации (под нештатной понимается любая ситуация, требующая вмешательства системы управления — отказ бортового оборудования, отклонение параметров движения КА от прогнозных значений, отклонение бортовой шкалы времени и т.д.);

$\tau^Q$  — длительность контроля результатов выполнения заявки (заявка полагается выполненной, если получено изображение с требуемым разрешением, отсутствием смаза изображения, отсутствием облачности и т.д.);

$p^a$  — вероятность ошибки первого рода при контроле результатов выполнения заявки;

$p^b$  — вероятность ошибки второго рода при контроле результатов выполнения заявки.

Требуется обосновать характеристики процесса управления ОГ (физический смысл данных характеристик раскрыт в [7, 8])

$$S^y = \{d, \pi, \tau^z, \tau^u\},$$

где  $d$  — достоверность данных о состоянии ОГ;

$\pi$  — полнота данных о состоянии ОГ;

$\tau^z$  — длительность анализа данных о состоянии ОГ;

$\tau^u$  — длительность выработки управляющих воздействий.

Агрегированная модель оценивания эффективности функционирования ОГ разработана на основании непрерывной марковской модели, предложенной в [9]. Граф состояний ОГ и интенсивности переходов представлены на рис. 1.

На рис. 1 обозначены:  $S_0$  — начало планирования выполнения заявки на получение данных ДЗЗ,  $S_1$  — начало выполнения заявки,  $S_2$  — состояние, соответствующее выполнению заявки,  $S_3$  — состояние, соответствующее невыполнению заявки,  $S_4$  — нештатная ситуация при обработке заявки,  $S_5$  — состояние, соответствующее принятию правильного решения о выполнении заявки,  $S_6$  — состояние, соответствующее принятию неправильного решения о выполнении

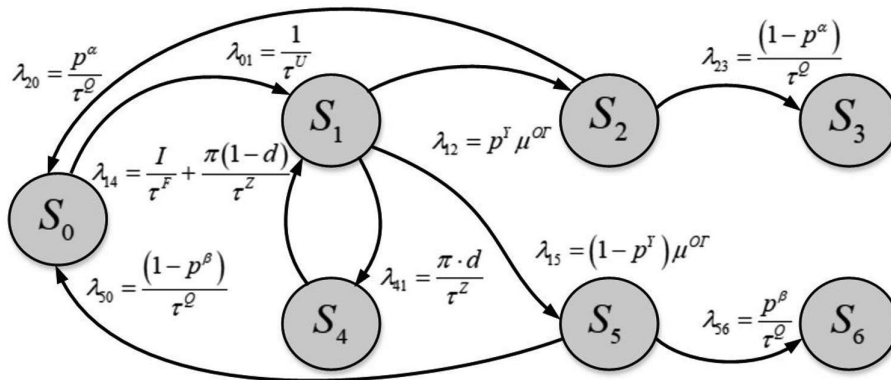


Рис. 1. Граф состояний ОГ ДЗЗ при выполнении заявки

нии заявки,  $\mu^{ог}$  — интенсивность выполнения заявки ОГ:

$$\mu^{ог} = \begin{cases} \frac{\mu^y}{\tau^y \lambda^{BX}}, & \frac{\lambda^{BX}}{\tau^y} > 1; \\ \frac{1}{\tau^y}, & \frac{\lambda^{BX}}{\tau^y} \leq 1. \end{cases} \lambda^{BX} =$$

$$= \lambda^X + \lambda^X (1 - p^y) (1 - p^b) + \lambda^X \cdot p^y \cdot p^a.$$

Динамика изменения вероятностей описывается системой дифференциальных уравнений, построенных по правилу А.Н. Колмогорова:

$$\begin{cases} \dot{p}_0(t) = p_2(t)\lambda_{20} + p_5(t)\lambda_{50} - p_0(t)\lambda_{01}; \\ \dot{p}_1(t) = p_0(t)\lambda_{01} + p_4(t)\lambda_{41} - \\ - p_1(t)(\lambda_{12} + \lambda_{15} + \lambda_{14}); \\ \dot{p}_2(t) = p_1(t)\lambda_{12} - p_2(t)(\lambda_{20} + \lambda_{23}); \\ \dot{p}_3(t) = p_2(t)\lambda_{23}; \\ \dot{p}_4(t) = p_1(t)\lambda_{14} - p_4(t)\lambda_{41}; \\ \dot{p}_5(t) = p_1(t)\lambda_{15} - p_5(t)(\lambda_{50} + \lambda_{56}); \\ \dot{p}_6(t) = p_5(t)\lambda_{56}. \end{cases}$$

Цель процесса функционирования ОГ заключается в переходе в невозвратное состояние  $S_3$  за время  $\tau^X$ . В качестве показателя эффективности функционирования ОГ выберем вероятность данного события, следовательно,  $\Theta = [0, 1]$ . Агрегированную модель процесса функционирования ОГ можно представить в виде

$$\Theta = f(S^y) = p_3(\tau^X, S^y, S^y).$$

Критерий оценивания эффективности можно сформулировать как множество  $\Theta^* = \{\Theta | \Theta \in \Theta, \Theta \geq \Theta^*\}$ , где  $\Theta^*$  — требуемое значение эффективности.

Для проведения численных исследований работоспособности генетического алгоритма и адекватности методики разработан программный модуль, реализующий генетический алгоритм [10]. Численные значения характеристик модели приведены в [9].

Исследования проводились для требований к эффективности  $\Theta^* = 0,85$ ,  $\Theta^* = 0,87$ ,  $\Theta^* = 0,9$ ,  $\Theta^* = 0,95$ .

Выходными данными программного модуля является множество Парето-оптимальных векторов  $S^y$  в пространстве характеристик процесса управления (фронт Парето). Каждый вектор представляет собой комбинацию характеристик, при которых выполняется ограничение  $f(S^y) \in \Theta^*$ , обеспечивающих выполнение требований (табл.).

Для иллюстрации результатов работы генетического алгоритма были исследованы пары  $d$ ,  $\pi$  (при значениях  $\tau^U = 0,1$  ч и  $\tau^Z = 0,5$  ч) и  $\tau^U$ ,  $\tau^Z$  (при значениях  $d = 0,95$  и  $\pi = 0,7$ ). Результаты расчетов возможных вариантов характеристик представлены на рис. 2 и 3.

Проведенные эксперименты показали сходимость результатов уже после 10 шагов генетического алгоритма.

## Заключение

Таким образом, предложен генетический алгоритм обоснования требований к характеристикам технических систем, основанный на алгоритме многокритериальной оптимизации SPEA2. Базовый алгоритм модифицирован для решения обратной задачи параметрического синтеза и дополнен алгоритмом фильтрации популяции, основанным на методе кластеризации  $k$ -means, который обеспечивает равномерность фронта Парето. Разработанный алгоритм может быть использован на этапе разработки

Таблица

Структура выходных данных программного модуля

| Критерий          | № варианта | Требования к характеристикам $S^y$ |         |         |          | $\Theta$ |
|-------------------|------------|------------------------------------|---------|---------|----------|----------|
|                   |            | $\tau^U$                           | $d$     | $\pi$   | $\tau^Z$ |          |
| $\Theta^* = 0,85$ |            | 0,26841                            | 0,91973 | 0,80389 | 3,30805  | 0,86236  |
|                   |            | 0,01292                            | 0,99902 | 0,80663 | 8,85426  | 0,85505  |
|                   | ...        | ...                                | ...     | ...     | ...      | ...      |



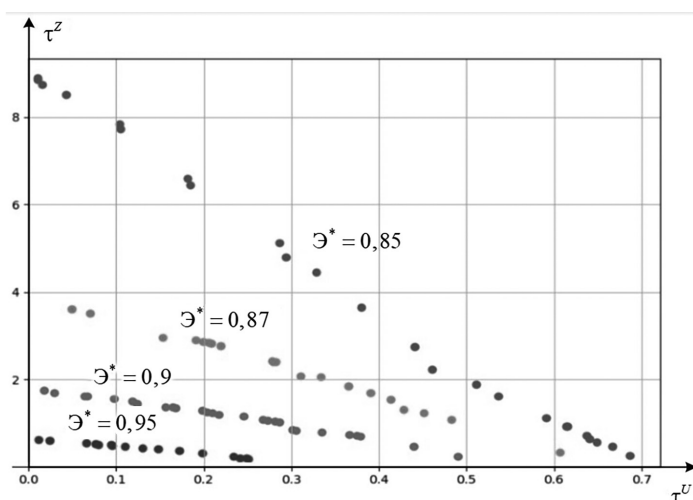


Рис. 2. Фронт Парето для  $\tau^U$ ,  $\tau^Z$

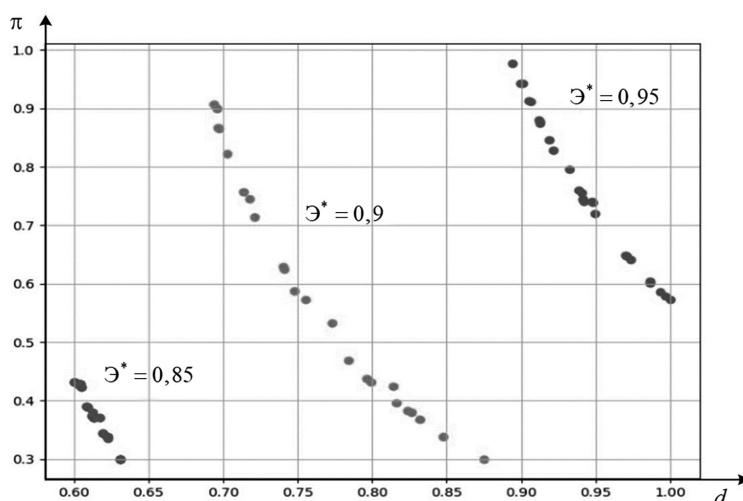


Рис. 3. Фронт Парето для  $d$  и  $\pi$

ТЗ на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию СТС при оформлении раздела «Технические требования к изделию». В результате применения алгоритма формируется не одно, а множество Парето-оптимальных решений, которое предоставляет определенную свободу выбора при принятии технических решений в ходе проектирования СТС.

Для проверки алгоритма разработан программный модуль, с применением которого проведены численные исследования по обоснованию характеристик процесса управления многоспутниковой ОГ ДЗЗ, которые подтверждают работоспособность алгоритма и сходимость результатов.

## Литература

1. ГОСТ 15.016–2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. М.: Стандартинформ, 2017. 30 с.
2. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.
3. Zitzler E., Laumanns M., Thiele L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm // TIK Report. 2001. Vol. 103.
4. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка переговоров при согласовании управленческих решений. М.: Синтез, 2003. 284 с.

5. Барсегян А.А., Куприянов М.С., Холод И.И. и др. Анализ данных и процессов: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.

6. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: учеб.-метод. пособие; под ред. Ю.Ю. Тарасевича. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. 87 с.

7. Данилюк Б.А., Минаков Е.П., Привалов А.Е., Александров М.А. Аналитический метод оценивания эффективности управления киберфизическими системами с учетом характеристик их цифровых двойников // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 4. С. 79–89.

8. Минаков Е.П., Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю. Метод оценивания характеристик цифровых моделей киберфизических систем на основе множественного регрессионного анализа результатов их применения // Труды МАИ. 2023. № 131. 29 с.

9. Минаков Е.П., Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю. Модель оценивания эффективности управления многоспутниковыми орбитальными системами // Труды МАИ. 2022. № 125. 26 с.

10. Программный модуль поиска Парето-оптимальных решений на основе генетического алгоритма SPEA2: свидетельство о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2024619573: № 2024618491 заявл. 13.04.2024: опубл. 24.04.2024.

## References

1. GOST 15.016–2016. System for development and launching products into production. Technical specifications. Requirements for content and design. Moscow: Standartinform, 2017. 30 p.

2. Petukhov G.B., Yakunin V.I. Improving the strength Pareto evolutionary algorithm [Methodological Foundations of External Design of Purposeful Processes and Purposeful Systems]. Moscow, AST, 2006, 504 p.

3. Zitzler E., Laumanns M., Thiele L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm // TIK Report. 2001. Vol. 103.

4. Trakhtengerts E.A. Computer support for negotiations in coordinating management decisions. M.: Sinteg. 2003. 284 p.

5. Barsegyan A.A., Kupriyanov M.S., Khodlod I.I. et al. Analysis of data and processes: textbook. 3rd ed., revised and enlarged. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2009. 512 p.

6. Panchenko T.V. Genetic algorithms: a teaching aid; ed. by Yu. Yu. Tarasevich. Astrakhan: Publishing House «Astrakhan University», 2007. 87 p.

7. Danilyuk B.A., Minakov E.P., Privalov A.E., Alexandrov M.A. Analytical method for assessing the efficiency of cyber-physical systems control taking into account the characteristics of their digital twins // Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 2023. № 4. Pp. 79–89.

8. Minakov E.P., Privalov A.E., Bugaychenko P.Yu. Method for assessing the characteristics of digital models of cyber-physical systems based on multiple regression analysis of the results of their application // Proceedings of MAI. 2023. № 131. 29 p.

9. Minakov E.P., Privalov A.E., Bugaychenko P.Yu. Model for assessing the efficiency of multi-satellite orbital systems control // Proceedings of MAI. 2022. № 125. 26 p.

10. Software module for searching for Pareto-optimal solutions based on the SPEA2 genetic algorithm: certificate of state registration of computer programs № 2024619573: № 2024618491 declared 13.04.2024: published 24.04.2024.