УДК 004.896; 621.396.1 Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2026-19-9-44-53

Оптимизация состава кабельного жгута летательного аппарата на основе эволюционно-роевого алгоритма

Р. Р. Гайнутдинов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ, Казань, Россия

emc-kai@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача снижения перекрестных помех в бортовом кабельном жгуте летательного аппарата. Предложен подход к оптимизации состава жгута, включающий перестановку проводников по посадочным местам, назначение индивидуальных экранов и формирование экранированных групп. Разработан эволюционно-роевой алгоритм с локальным поиском, объединяющий генетическую фазу с ограниченным доминированием, пчелиный локальный поиск в каждом поколении и остановку по критерию стабилизации гиперобъема. Для описания электромагнитных взаимодействий предложена двухуровневая схема расчета перекрестных помех. На практическом примере показано, что нарушения требований электромагнитной совместимости в исходной раскладке проводников устраняются построением фронта допустимых решений разработанным алгоритмом, каждое из которых подтверждено строгим методом без ложноположительных результатов. Установлено, что консервативность быстрой модели сохраняется на всем множестве найденных решений, а время получения подтвержденного решения у предложенного алгоритма меньше, чем у генетического, пчелиного и гибридного алгоритмов. Выявлено, что при увеличении числа проводников преимущество по числу подтвержденных решений возрастает. Показано, что предложенные схема расчета наводок и алгоритм обеспечивают проектирование состава бортового кабельного жгута с гарантированным выполнением требований электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: кабельный жгут, электромагнитная совместимость, перекрестные помехи, общий экран, многопроводные линии передачи, многокритериальная оптимизация, эволюционно-роевой алгоритм, фронт Парето

Для цитирования: Гайнутдинов Р. Р. Оптимизация состава кабельного жгута летательного аппарата на основе эволюционно-роевого алгоритма // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 9. С. 44–53. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-44-53.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования FZSU-2026-0010, рег. номер НИОКТР 126102326506-8.

Original article

Optimization of the Aircraft Cable Harness Composition Using an Evolutionary-Swarm Algorithm

R. R. Gaynutdinov

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev–KAI, Kazan, Russia

emc-kai@mail.ru

Abstract. The problem of reducing crosstalk in an aircraft onboard wiring harness is considered. An approach to optimizing the harness composition is proposed, comprising the reassignment of conductors to mounting positions, the assignment of individual shields, and the formation of shielded groups. An evolutionary swarm algorithm with local search has been developed, combining a genetic phase with bounded dominance, bee-colony local search at each generation, and termination based on a hypervolume stabilization criterion. A two-level scheme for calculating crosstalk is proposed to describe the underlying electromagnetic interactions. A practical example demonstrates that electromagnetic compatibility (EMC) violations present in the initial con-

© Гайнутдинов Р. Р., 2026

ductor layout are eliminated by constructing, with the developed algorithm, a front of feasible solutions, each of which is confirmed by the rigorous method with no false positives. It is established that the conservatism of the fast model is preserved across the entire set of solutions obtained, and that the time required to reach a confirmed solution with the proposed algorithm is lower than with the genetic, bee-colony, and hybrid algorithms. It is shown that the advantage in the number of confirmed solutions increases with the number of conductors. It is demonstrated that the proposed interference calculation scheme and algorithm enable the design of an onboard wiring harness composition with guaranteed compliance with electromagnetic compatibility requirements.

Keywords: cable harness, electromagnetic compatibility, crosstalk, overall shield, multiconductor transmission lines, multiobjective optimization, evolutionary-swarm algorithm, Pareto front

For citation: Gaynutdinov R. R. Optimization of the Aircraft Cable Harness Composition Using an Evolutionary-Swarm Algorithm // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 9. P. 44–53. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-44-53.

Funding: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education FZSU-2026-0010, registration number NIOKTR 126102326506-8.

Введение. Бортовая кабельная сеть современного летательного аппарата объединяет сотни цепей различного назначения, уложенных в общие жгуты. Плотная компоновка порождает перекрестные помехи – паразитную емкостную и индуктивную связь между линиями связи [1], [2]. В свою очередь, требования к электромагнитной совместимости бортового оборудования регламентированы [3], [4] и должны выполняться на всех этапах проектирования. Типовым конструктивным решением для ответственных жгутов служит общий заземленный экран [5]: он ослабляет внешние воздействия, однако не устраняет взаимодействия внутри жгута, поэтому состав жгута – взаимное расположение проводников, индивидуальные экраны и экранированные группы – остается главным ресурсом для снижения перекрестных помех.

Существующая практика снижения электромагнитных взаимодействий внутри жгута опирается на нормативные правила разнесения цепей по категориям и типовые решения по экранированию [5]–[7]: чувствительные цепи прокладывают в отдельных группах, силовые – обеспечивают индивидуальными экранами, а весь жгут – общим металлическим экраном. Существующая практика и рекомендации при необходимости плотной компоновки приводят к избыточной массе экранирования. В свою очередь отсутствие должного экранирования, приводит к нарушениям требований электромагнитной совместимости, выявляемым уже на испытаниях. Методы исследования перекрестных электромагнитных помех получили развитие от инженерных оценок на основе коэффициентов связи [2], [5] до строгих моделей многопроводных линий передачи [1], [7], [8]. Вместе с тем, применение указанных методов преимущественно ориентировано на анализ уже заданной конфигурации проводников и не позволяет непосредственно решить задачу формирования оптимального состава жгута. В связи с этим требуется интеграция расчетной модели перекрестных помех с процедурой структурно-параметрического синтеза жгута [9].

Прямой перебор возможных вариантов состава жгута практически неприменим вследствие комбинаторного роста пространства решений, определяемого перестановками проводников, вариантами их экранирования и способами разбиения на функциональные группы. Дополнительную сложность создает многокритериальный характер задачи: снижение уровня перекрестных помех, как правило, сопровождается увеличением массы и конструктивной сложности экранирования. При этом проведение строгого расчета каждого варианта на основе теории многопроводных линий передачи требует значительных вычислительных затрат, что существенно ограничивает возможность использования полного перебора.

Перспективным инструментом решения подобных задач служат многокритериальные эволюционные алгоритмы [10]–[12]. Однако универсальные методы оптимизации в общем случае не учитывают специфические особенности рассматриваемой задачи, включая наличие жестких ограничений по электромагнитной совместимости, возможность возникновения резонансных режимов и высокую вычислительную стоимость точного моделирования.

Целью настоящей работы состоит в разработке и исследовании специализированного эволюционно-роевого алгоритма оптимизации состава кабельного жгута, основанного на применении двухуровневой схемы расчета перекрестных помех и локального пчелиного поиска. Предлагаемый подход направлен на формирование множества конструктивных решений, удовлетворяющих

установленным требованиям электромагнитной совместимости при одновременном учете массогабаритных и вычислительных ограничений.

Электромагнитные взаимодействия между кабельными линиями связи летательного аппарата. Рассматривается жгут из n проводников круглого сечения длиной L, размещенный в общем заземленном экране внутреннего радиуса R, который выступает опорным проводником обратного тока. Погонные параметры определяются в квазистатическом приближении методом зеркальных изображений в круглом экране [1], [8]: проводнику i, отстоящему от оси экрана на расстояние ρ_i, соответствует изображение противоположного знака на том же луче на расстоянии R^2/ρ_i. Собственные L_{ii} и взаимные L_{ij} погонные индуктивности выражаются через расстояния до изображений:

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{R^2-\rho_i^2}{Ra_i},\ L_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{d'_{ij}}{d_{ij}},$$

где a_i – радиус жилы проводника i; d_{ij} – расстояние между проводниками i и j; d'_{ij} – расстояние от изображения проводника i до проводника j; μ_0 – магнитная постоянная. Матрица потенциальных коэффициентов **P** строится по тем же геометрическим соотношениям с учетом эффективной диэлектрической проницаемости изоляции, а матрицы емкостей **C** и проводимостей утечки **G** получаются из нее обращением

$$\mathbf{C} = \mathbf{P}^{-1},\ \mathbf{G} = \omega\mathbf{C}\ \mathrm{tg}\ \delta,$$

где tg δ – тангенс угла потерь изоляции; ω – круговая частота. Связь пары (i, j) в приближении слабой связи электрически короткой линии описывается коэффициентами ближней $K_{ij\,\mathrm{NE}}$ и дальней $K_{ij\,\mathrm{FE}}$ наводок

$$K_{ij\,\mathrm{NE}} = \frac{1}{4}\left(\frac{L_{ij}}{L_{ii}} + \frac{|C_{ij}|}{C_{ii}}\right);$$

$$K_{ij\,\mathrm{FE}} = \frac{L}{2v_i t_{\phi,i}}\left|\frac{L_{ij}}{L_{ii}} - \frac{|C_{ij}|}{C_{ii}}\right|,$$

где L_{ij}, C_{ij} – взаимные и собственные погонные индуктивности и емкости; v_i – фазовая скорость в линии источника помех; $t_{i\,\phi}$ – длительность фронта сигнала. Квазистатические коэффициенты связи могут систематически занижать уровень перекрестных помех для пространственно удаленных пар проводников вблизи резонансных частот линии, где формирование стоячих волн приводит к ослаблению зависимости уровня связи от взаимного положения проводников в поперечном сечении. Для учета данного эффекта вводится коэффициент K_0, определяющий нижнюю границу структурной связи для неэкранированной пары проводников. Тогда эффективный коэффициент связи с учетом экранирования принимает вид

$$K_{ij\,\mathrm{эф}} = \max\left(K_{ij\,\mathrm{NE}}, K_{ij\,\mathrm{FE}}, K_0\right)\cdot 10^{-SE_{ij}/20},$$

где SE_{ij} – суммарная эффективность экранирования пары, дБ: сумма вкладов индивидуальных экранов источника и рецептора помех (60 дБ для одинарной медной оплетки, 74 дБ для двойного экрана) и группового экрана (40 дБ), если проводники принадлежат разным группам; модель принята частотно-независимой по паспортным значениям для медной оплетки [3]. Значение K_0 предложено калибровать автоматически по строгой модели: для трех пробных источников помех, разнесенных по сечению жгута без экранов. Для рассматриваемой конфигурации $K_0 = 7.23 \cdot 10^{-5}$.

Уровень помехи на рецепторе помех в j-м проводнике определяется когерентным суммированием спектров вкладов всех источников помех по методике [13]. Вклад источника помех от i-го проводника описывается спектральной плотностью сигнала с учетом эффективной связи, фазового запаздывания и делителя напряжения нагрузки:

$$U_{ij}(f) = K_{ij\,\mathrm{эф}}\, k_{j\,\mathrm{дел}}\, V_i\, t_{i\,\phi}\,\mathrm{sinc}\left(\pi f t_{i\,\phi}\right)\mathrm{e}^{-j2\pi f\tau_{ij}},$$

где V_i – амплитуда сигнала источника помех; $k_{j\,\mathrm{дел}} = Z_{j\,\mathrm{н}}/\left(Z_{j\,\mathrm{и}} + Z_{j\,\mathrm{н}}\right)$ – делитель напряжения рецептора помех; $Z_{j\,\mathrm{н}}$ – комплексное сопротивление нагрузки; $Z_{j\,\mathrm{и}}$ – внутреннее комплексное сопротивление источника; τ_{ij} – постоянная распространения; f – частота. Суммарный спектр $U_j = \sum_i U_{ij}$ переводится во временную область обратным дискретным преобразованием Фурье и пиковое значение принимается за уровень помехи

$$P_j = \max_m\left|\frac{4f_{N-1}}{N_f}\sum_{k=1}^{N_f}\left(-I_m\, U_j(f_k)\right)\sin\left(2\pi f_k t_m\right)\right|,$$

где $U_j(f_k)$ – суммарный комплексный спектр наводки на рецепторе помех j; N_f – число частотных точек; f_k – значение частоты в k-м узле дискретной частотной сетки; t_m – узлы временной сетки, покрывающей один период частотного

разрешения; m – индекс узла временной сетки; I_m – значение восстановленного во временной области сигнала наводки в m-м узле временной сетки. Быстрая модель требует одного обращения матрицы на вариант структуры, что допускает десятки тысяч оценок в цикле оптимизации.

Строгий метод расчета использует теорию многопроводных линий передачи: распространение напряжений и токов вдоль жгута описывается телеграфными уравнениями [1, с. 282]:

$$\frac{d\mathbf{U}(z,f)}{dz} = -\mathbf{Z}(f)\mathbf{I}(z,f),$$

$$\frac{d\mathbf{I}(z,f)}{dz} = -\mathbf{Y}(f)\mathbf{U}(z,f),$$

$$\mathbf{Z}(f) = \mathbf{R} + j\omega\mathbf{L},\ \mathbf{Y}(f) = \mathbf{G} + j\omega\mathbf{C},$$

где $\mathbf{U}(z,f)$ и $\mathbf{I}(z,f)$ – векторы комплексных амплитуд напряжений и токов проводников на продольной координате (z), z – координата вдоль кабельного жгута. Решение данных уравнений для отрезка длиной L выражается передаточной матрицей

$$\mathbf{H}(f) = \exp(-\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{L}),\ \boldsymbol{\Gamma} = \sqrt{\mathbf{Z}(f)\mathbf{Y}(f)},$$

где $\mathbf{R}$ – диагональная матрица активных сопротивлений с учетом скин-эффекта. Квадратный корень матрицы вычисляется итерацией Денмана–Биверса [14] с нормировкой, матричная экспонента – методом масштабирования и возведения в квадрат; расчет выполняется на $N_f = 100$ частотах. Спектры вкладов, свертка и пиковая метрика у обоих методов общие – методы образуют две ступени точности одной величины. Быстрая модель консервативна: решение, допустимое по ней, подтверждается строгим методом; именно это свойство лежит в основе двухуровневого поиска.

Постановка задачи оптимизации состава кабельного жгута. Решение описывается кортежем $x = (\pi, \mathbf{s}, g)$, где π – перестановка проводников по посадочным местам сечения; $\mathbf{s}$ – вектор индивидуальных экранов (нет, одинарный, двойной); g – разбиение на экранированные группы. Качество решения оценивается тремя критериями ($F_1(x)$ – максимальное значение уровня помехи среди всех проводников; $F_2(x)$ – масса экранирования; $F_3(x)$ – суммарная квадратичная помеха по всем проводникам):

$$F_1(x) = \max_j P_j(x) \to \min;$$

$$F_2(x) = M_{\text{экр}}(x) \to \min;$$

$$F_3(x) = \sum_{j=1}^{n} P_j^2(x) \to \min,$$

где $P_j(x)$ – уровень помехи на рецепторе j; $M_{\text{экр}}$ – суммарная масса экранирования (индивидуальные и групповые экраны). Нормативное ограничение электромагнитной совместимости формулируется через штраф

$$\Phi(x) = \sum_{j=1}^{n}\left[\max\left(0, \frac{P_j(x)}{P_{j\,\text{доп}}} - 1\right)\right]^2 = 0,$$

где $P_{j\,\text{доп}}$ – допустимый уровень помехи на рецепторе j. Решения сравниваются по ограниченному доминированию [9]: допустимое решение ($\Phi = 0$) всегда предпочтительнее недопустимого; недопустимые сравниваются по Ф; допустимые – по доминированию Парето критериев. Результатом задачи является фронт Парето допустимых решений, каждое из которых подтверждено строгим методом.

Оптимизация состава кабельного жгута. В качестве базовых методов сравнительного анализа выбраны генетический алгоритм с недоминируемой сортировкой [9], пчелиный алгоритм [11], [15] и их последовательная комбинация по схеме «генетический алгоритм → пчелиный алгоритм». Генетический подход ранее применялся и к смежной задаче – размещению антенных систем на летательном аппарате с учетом электромагнитной совместимости [16]. Применительно к задаче существенно ограничивает указанные подходы отсутствие специализированного механизма учета ограничений электромагнитной совместимости непосредственно в процедуре отбора. В условиях многокритериальной оптимизации это приводит к смещению множества недоминируемых решений в область уменьшения массы экранирования, расположенную вблизи границы допустимости или за ее пределами, вследствие чего доля решений, удовлетворяющих нормативным требованиям, существенно снижается.

Для устранения указанного недостатка разработан эволюционно-роевой алгоритм с локальным поиском (ЭРАЛ), объединяющий глобальный эволюционный поиск с локальной роевой оптимизацией, выполняемой на каждом поколении (рис. 1).

Отличительной особенностью ЭРАЛ служит совместное применение трех взаимосвязанных механизмов: ограниченного доминирования при селекции, обеспечивающего приоритет решений, удовлетворяющих ограничениям ЭМС; локального пчелиного поиска в окрестностях элитных недоминируемых решений с непосредственным включением найденных улучшений в текущую популяцию; критерия завершения поиска по ста-

билизации гиперобъема Парето-фронта, позволяющего прекращать вычисления при отсутствии существенного прогресса оптимизации. Оценивание решений в основном цикле ЭРАЛ осуществляется с использованием вычислительно эффективной «быстрой» модели, что обеспечивает возможность исследования значительного числа вариантов структуры жгута. После завершения оптимизации решения сформированного допустимого Парето-фронта верифицируются строгим методом расчета. При этом строгий метод используется исключительно для подтверждения выполнения ограничений и достоверности найденных решений и не применяется для последующего расширения или модификации сформированного фронта.

Генетическая фаза использует операторы, сохраняющие корректность хромосомы. Для перестановки проводников применяется сегментный кроссовер с восстановлением взаимно однозначного соответствия «проводник – посадочное место», а для параметров индивидуального экранирования и групповой принадлежности – равномерный кроссовер. Мутация включает взаимную перестановку двух проводников, изменение типа индивидуального экрана и переназначение проводника между экранированными группами с последующей нормализацией их нумерации. Пчелиная фаза выполняется на каждом поколении в окрестностях m лучших решений первого недоминируемого фронта. Радиус локального поиска постепенно уменьшается с номером поколения, обеспечивая переход от исследования более широких окрестностей к уточнению перспективных решений. Найденное решение принимается при его превосходстве над центром участка по правилу ограниченного доминирования и сразу включается в текущую популяцию, влияя на последующие этапы отбора и рекомбинации.

Критерий останова использует гиперобъем $HV(P_t)$ – меру области критериального пространства, доминируемой текущим фронтом P_t относительно фиксированной опорной точки [12]. Поиск завершается досрочно, если

$$\left|HV\left(P_t\right) - HV\left(P_{t-1}\right)\right| < \varepsilon,$$
$$t = t_0,\ \ldots,\ t_0 + T,$$

т. е. если фронт стабилен в течение T последовательных поколений (ε – порог стабилизации, t_0 – длина интервала стабилизации). Это высвобождает вычислительный бюджет на малых и средних задачах, не ограничивая поиск на больших.

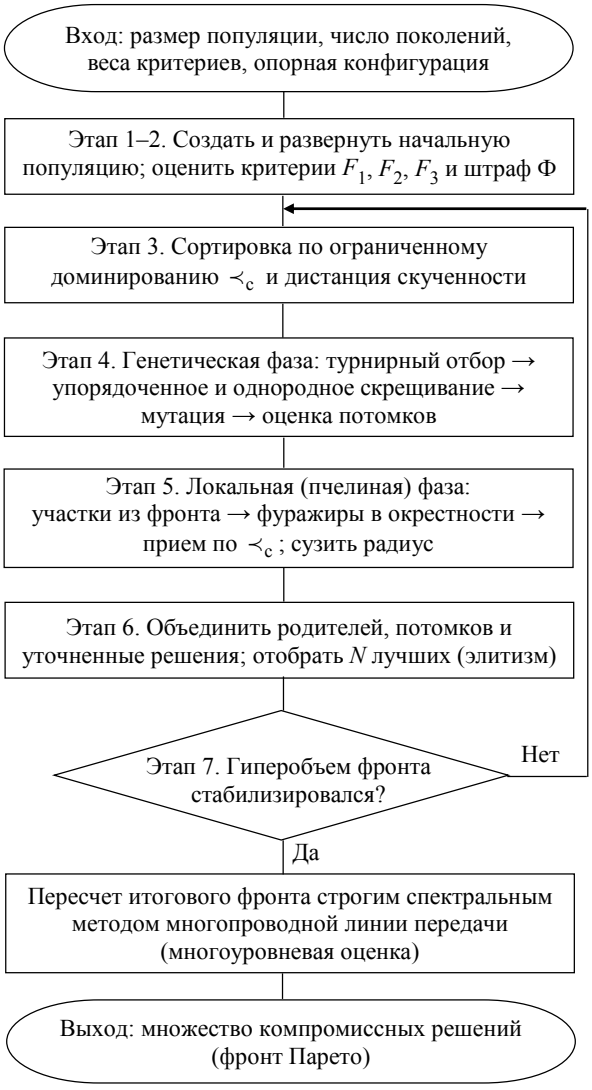


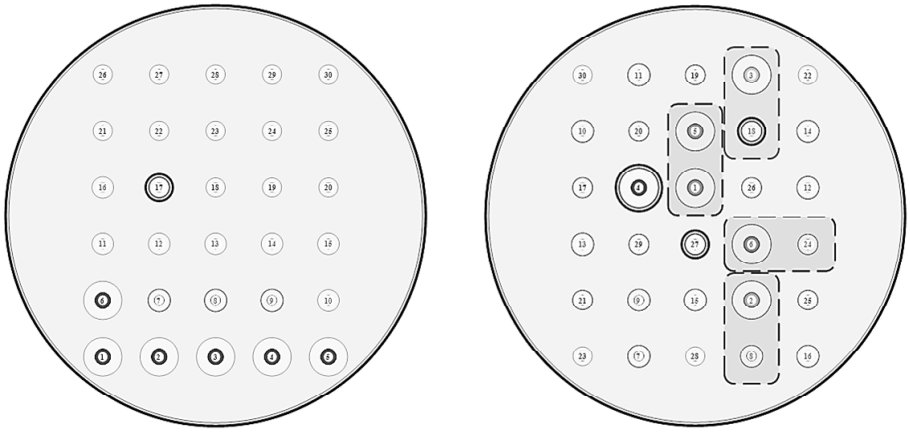
Рис. 1. Схема алгоритма ЭРАЛ
Fig. 1. Scheme of the ESAL algorithm

Практический пример оптимизации. Алгоритм реализован в программном комплексе (.NET 8) и испытан на типовом жгуте из 30 проводников трех категорий длиной 2.4 м в общем заземленном экране внутреннего диаметра 35 мм (минимальный охватывающий габарит с запасом 5 %). Исходные данные проводников приведены в табл. 1: шесть силовых цепей с ШИМ-сигналами большой амплитуды (источники помех), десять цифровых линий связи и четырнадцать низкоуровневых датчиковых цепей с допустимым уровнем помехи 5 мВ (наиболее уязвимые рецепторы помех). Изоляция – фторопласт ($\varepsilon r = 2.1$; $\operatorname{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-4}$), материал жил – медь.

Исходная раскладка (рис. 2, *а*) выполнена без учета электромагнитной совместимости: максимальная наводка составляет 82.6 В, нормативы нарушены на 26 из 30 рецепторов помех. Парамет-

Табл. 1. Исходные данные проводников жгута
Tab. 1. Input data of the harness conductors

Категория	Кол-во проводников	Назначение	V, В	$t_ф$, с	Полоса, Гц	$Z_и/Z_н$, Ом	$P_{доп}$, В
B	6	Силовые (ШИМ)	270	10^{-7}	$10^3 \ldots 10^7$	10/50	50
C	10	Цифровые (ARINC 429)	3.3	$2 \cdot 10^{-7}$	$10^4 \ldots 5 \cdot 10^7$	75/75	0.5
D	14	Датчиковые	0.05	10^{-6}	$1 \ldots 10^4$	$100/10^4$	0.005



а ... *б*

Рис. 2. Сечение жгута до (*а*) и после (*б*) оптимизации алгоритмом ЭРАЛ
Fig. 2. Harness cross-section before (*a*) and after (*б*) optimization by ESAL

ры алгоритма – значения по умолчанию программного комплекса: популяция $N = 100$, поколений $G = 200$, вероятности скрещивания и мутации 0.9 и 0.2; автокалибровка пола связи выполняется однократно перед поиском тремя строгими расчетами и занимает менее секунды. На рис. 2 внешняя окружность – общий заземленный экран жгута; малые окружности – проводники (номер соответствует исходной нумерации цепей); утолщенная обводка проводника обозначает индивидуальный экран (двойная – двойной экран); штриховыми контурами выделены экранированные группы.

Алгоритм ЭРАЛ построил фронт Парето из 100 решений, каждое из которых допустимо по быстрой модели и подтверждено строгим методом. Фронт покрывает широкий диапазон компромиссов: по максимальной наводке – от $3.39 \cdot 10^{-6}$ до $9.66 \cdot 10^{-3}$ В (все решения имеют запас к самому жесткому нормативу 5 мВ), по массе экранирования – от 0.41 до 0.70 кг. Полный фронт в трех критериях показан на рис. 3: решения образуют поверхность компромисса «уровень помех – масса экранирования», причем критерии F_1 и F_3 на нем согласованы (суммарная энергия помех убывает вместе с максимумом), а обмен идет главным образом между помехами и массой: снижение F_1 на порядок требует прироста массы экранирования на 0.05…0.15 кг.

Компромиссное решение, отвечающее минимуму взвешенной суммы нормированных критериев (рис. 2, *б*), обеспечивает снижение максимального уровня наводки с 82.6 В для исходной конфигурации до $9.18 \cdot 10^{-6}$ В, т. е. более чем на шесть порядков, при массе экранирующих элементов 0.42 кг и двукратном запасе по напряжению (6 дБ) относительно нормативного уровня. Полученная конфигурация характеризуется переносом чувствительных цепей в посадочные места, удаленные от силовых, формированием пяти экранированных групп по два проводника, а также назначением индивидуальных экранов сорока проводникам, из которых для десяти применено

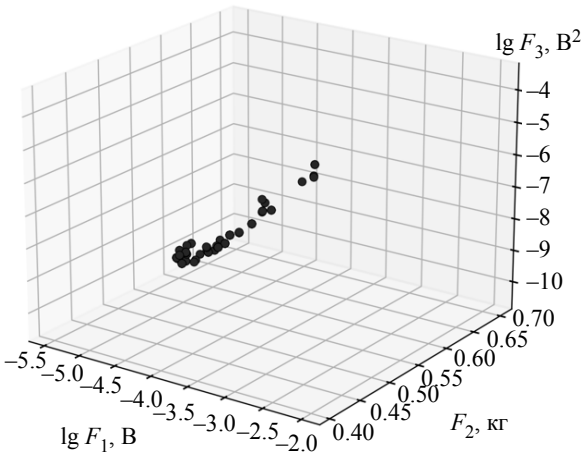


Рис. 3. Фронт Парето ЭРАЛ в трех критериях (общий экран, 30 проводников)
Fig. 3. Pareto front of ESAL in three criteria (overall shield, 30 conductors)

двойное экранирование. Результатом решения многокритериальной задачи служит не единственная конфигурация, а множество Парето-оптимальных решений, охватывающее диапазон от минимальной массы экранирования при выполнении нормативных требований до максимального запаса помехозащищенности; выбор рабочей точки на фронте Парето осуществляется исходя из внешних проектных ограничений.

Оценка эффективности алгоритмов оптимизации. Сравнение выполнено при одинаковых исходных данных; итогом каждого алгоритма считается перепроверенный фронт – решения, найденные допустимыми при поиске и подтвержденные строгим методом. Результаты для жгута из 30 проводников приведены в табл. 2, фронты – на рис. 4.

Фронт, построенный ЭРАЛ, целиком образован допустимыми решениями (100 из 100 подтверждены эталонной моделью), тогда как у алгоритмов сравнения допустимой оказывается лишь часть фронта – соответственно 22, 30 и 41 решение из 100 генетического, пчелиного и гибридного алгоритмов. Причина различия состоит в том, что при отсутствии механизма ограниченного доминирования оператор отбора удерживает значительную долю популяции за пределами допустимой области. Во всех рассмотренных случаях результаты эталонного подтверждения совпали с оценками, полученными в ходе поиска; ложноположительные решения не зафиксированы, что служит экспериментальным подтверждением консервативности быстрой модели с нижней границей связи. Время собственно поиска у ЭРАЛ более чем втрое меньше за счет останова по критерию стабилизации гиперобъема (1.7 с против 5.5…5.8 с), однако определяющим служит удельный показатель. В качестве интегральной оценки вычислительных затрат принято время получения одного подтвержденного решения, включающее этапы поиска и подтверждения: для ЭРАЛ оно составляет 0.11 с, для алгоритмов сравнения – 0.23…0.34 с. Преимущество обусловлено тем, что решения, подтверждаемые эталоном, формируются ЭРАЛ непосредственно в процессе поиска, без последующей отбраковки.

Табл. 2. Результаты оптимизации жгута из 30 проводников в общем экране
Tab. 2. Optimization results for the 30-conductor harness inside the overall shield

Алгоритм	Фронт	Допустимо при поиске	Подтверждено эталоном	F_1, В	F_2, кг	Время поиска, с
Генетический	100	22	22	$1.08 \cdot 10^{-5}$	0.40	5.5
Пчелиный	99	30	30	$1.47 \cdot 10^{-6}$	0.75	5.6
Гибридный	100	41	41	$4.35 \cdot 10^{-6}$	0.46	5.8
ЭРАЛ	100	100	100	$9.18 \cdot 10^{-6}$	0.42	1.7

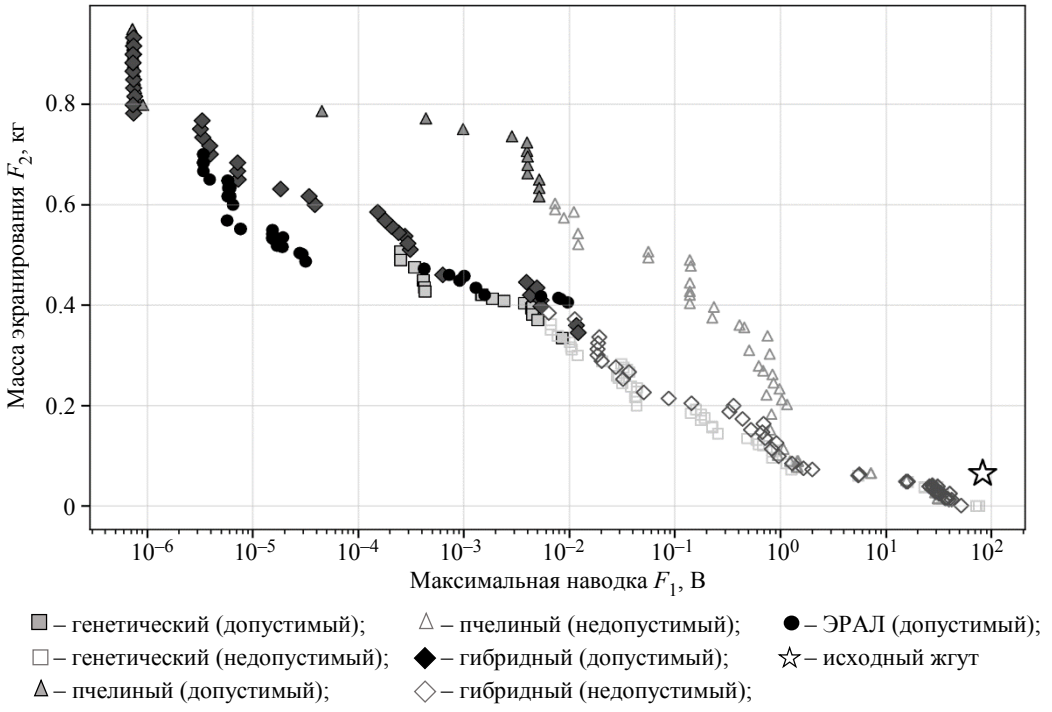


Рис. 4. Фронты Парето четырех алгоритмов (общий экран, 30 проводников); звезда – исходный жгут
Fig. 4. Pareto fronts of the four algorithms (overall shield, 30 conductors); star – initial harness

Масштабируемость исследована на жгутах из 10, 25, 50, 75, 100, 125 и 150 проводников в общем экране при неизменном вычислительном бюджете (рис. 5; табл. 3).

Сопоставление алгоритмов по времени поиска без учета его результата некорректно, поскольку поиск, не давший подтвержденных решений, не приводит к получению результата. В связи с этим на рис. 5, *а* приведено удельное время получения одного подтвержденного решения – суммарное время поиска и подтверждения, отнесенное к мощности итогового фронта. По данному показателю ЭРАЛ обеспечивает наименьшие значения во всем исследованном диапазоне размерностей, что объясняется отсутствием отбраковки решений на этапе подтверждения. Число подтвержденных решений у алгоритмов сравнения снижается до единичных значений уже при 75–100 проводниках, тогда как фронт ЭРАЛ подтверждается полностью при любой размерности задачи; при 150 проводниках непустой подтвержденный фронт получен только этим алгоритмом – 77 подтвержденных решений против 1 у лучшего из алгоритмов сравнения.

Удельное время получения одного подтвержденного решения у ЭРАЛ минимально во всем исследованном диапазоне и монотонно возрастает с числом проводников. Различие в результативности с ростом размерности усиливается: при 10 проводниках алгоритмы сравнения дают 58–71 подтвержденное решение против 100 у ЭРАЛ, при 75 – от 0 до 12 против 28, при 150 их итоговый фронт содержит не более одного решения. Наблюдаемая деградация носит систематический характер и обусловлена сокращением доли допустимой области в пространстве поиска алгоритмов.

Трудоемкость строгой верификации пропорциональна числу подтверждаемых решений и растет кубически с числом проводников, поэтому на жгутах большой размерности верификация оказывается длительнее поиска: при 150 проводниках подтверждение фронта ЭРАЛ из 77 решений занимает больше времени, чем его построение, тогда как у алгоритмов сравнения оно укладывается в единицы секунд ввиду малого числа подтверждаемых решений. Это соотношение не ограничивает применимость подхода: верификация

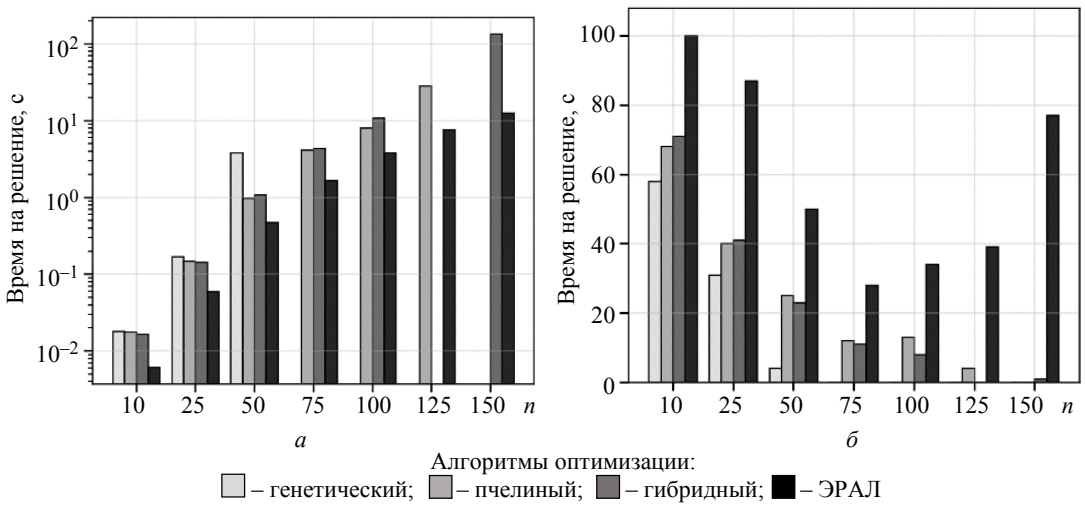


Рис. 5. Масштабируемость алгоритмов в общем экране: *а* – время получения одного подтвержденного решения; *б* – итоговый перепроверенный фронт
Fig. 5. Scalability of the algorithms inside the overall shield: *a* – time per confirmed solution; *б* – final re-verified front

Табл. 3. Масштабируемость алгоритмов в общем экране: время поиска и подтвержденный фронт
Tab. 3. Scalability of the algorithms inside the overall shield: search time and confirmed front

n	Время решения ЭРАЛ, с	Время решения других алгоритмов, с	ЭРАЛ	Генетический	Пчелиный	Гибридный
10	0.01	0.02…0.02	100	58	68	71
25	0.06	0.14…0.17	87	31	40	41
50	0.47	0.97…3.82	50	4	25	23
75	1.67	4.12…4.32	28	0	12	11
100	3.79	8.07…10.86	34	0	13	8
125	7.60	28.39…28.39	39	0	4	0
150	12.45	134.71–134.71	77	0	0	1

выполняется однократно по завершении поиска и допускает распараллеливание по решениям фронта.

Заключение. Предложен подход к оптимизации состава кабельного жгута летательного аппарата, основанный на разработке согласованной двухуровневой схемы расчета перекрестных помех и эволюционно-роевом алгоритме с локальным поиском. Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Построена двухуровневая схема расчета перекрестных помех: быстрая модель коэффициентов связи с предложенной резонансной нижней границей, автоматически калибруемой по строгой модели, и строгий метод многопроводных линий передачи; согласование уровней позволяет трактовать оба метода как две ступени точности единой оценки.

2. Экспериментально показана консервативность быстрой модели: во всех запусках (более 2900 найденных решений по всем исследованным размерам жгута) результат эталонного подтверждения совпал с оценкой, полученной при поиске, – ложноположительные решения не выявлены; следовательно, каждое решение, предлагаемое проектировщику, гарантированно удовлетворяет нормативным требованиям электромагнитной совместимости.

3. Разработан алгоритм ЭРАЛ, объединяющий ограниченное доминирование, пчелиный локальный поиск на каждом поколении и останов по критерию стабилизации гиперобъема. На практическом примере (жгут из 30 проводников в экране диаметром 35 мм) исходная раскладка, при которой нормативы были нарушены на 26 рецепторах помех, преобразована во фронт из 100 подтвержденных решений со снижением максимального уровня наводки более чем на шесть порядков; время получения одного подтвержденного решения составило 0.11 с – в 2–3 раза меньше, чем у генетического, пчелиного и гибридного алгоритмов. Исследование масштабируемости на жгутах из 10–150 проводников показало, что преимущество ЭРАЛ возрастает с увеличением размерности задачи: при 150 проводниках итоговый подтвержденный фронт ЭРАЛ содержит 77 решений, тогда как у лучшего из алгоритмов сравнения – не более одного.

4. Алгоритм реализован в виде программного комплекса на платформе .NET 8 с воспроизводимыми консольными режимами прогонов и может быть использован на этапе проектирования бортовой кабельной сети. Направления дальнейших исследований включают учет трехмерной трассы жгута с изгибами и переменным сечением, частотно-зависимых характеристик экранов, а также адаптивное наращивание вычислительного бюджета с ростом числа проводников.

Список литературы

1. Paul C. R. Analysis of multiconductor transmission lines. 2nd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2008. 800 p.

2. Paul C. R. Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2006. 1016 p.

3. Szpakowska-Peas E., Filipowicz M. Selected aspects of electronic hardware development and testing for the flight reconfiguration system in accordance with the RTCA DO-160G standard // Aircraft Engin. and Aerospace Technol. 2025. Vol. 97, no. 1. P. 28–36. doi: 10.1108/AEAT-03-2024-0083.

4. Кечиев Л. Н., Балюк Н. В. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС. М.: Грифон, 2014. 448 с.

5. Ott H. W. Electromagnetic compatibility engineering. Hoboken: Wiley, 2009. 872 p.

6. Гайнутдинов Р. Р., Чермошенцев С. Ф. Прогнозирование внутрисистемной электромагнитной совместимости беспилотных летательных аппаратов // Вестн. Казанского гос. техн. ун-та им. А. Н. Туполева. 2014. № 4. С. 124–130.

7. Tesche F. M., Ianoz M. V., Karlsson T. EMC Analysis methods and computational models. New York: Wiley, 1997. 656 p.

8. Gaynutdinov R. R., Chermoshentsev S. F. Study of crosstalks in the cables of unmanned aerial vehicle // 2017 Intern. Siberian Conf. on Control and Commun. (SIBCON). Astana, Kazakhstan: IEEE, 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998540.

9. A Fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II / K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan // IEEE Trans. Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6, no. 2. P. 182–197. doi: 10.1109/4235.996017.

10. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Chichester: Wiley, 2001. 518 p.

11. Pham D. T., Castellani M. The bees algorithm: Modelling foraging behaviour to solve continuous optimization problems // Proc. IMechE, Part C: J. Mechan. Engin. Sci. 2009. Vol. 223, no. 12. P. 2919–2938. doi: 10.1243/09544062JMES1494.

12. Coello Coello C. A., Lamont G. B., Van Veldhuizen D. A. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. 2nd ed. New York: Springer, 2007. 800 p.

13. Гайнутдинов Р. Р., Чермошенцев С. Ф. Методология исследования электромагнитной стойкости технических систем при внешних электромагнитных воздействиях от нескольких источников // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 1. С. 135–141.

14. Denman E. D., Beavers A. N. The matrix sign function and computations in systems // Appl. Math. and Comp. 1976. Vol. 2, no. 1. P. 63–94. doi: 10.1016/0096-3003(76)90020-5.

15. The bees algorithm – A novel tool for complex optimisation problems / D. T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi // Proc. 2nd Intern. Virtual Conf. on Intelligent Production Machines and Syst. (IPROMS 2006). Cardiff, UK: Elsevier Ltd, 2006. P. 454–459.

16. Gaynutdinov R., Suzdaltsev I. Genetic algorithm for optimization placement of antennas on aircraft // Intern. Russ. Automation Conf. (RusAutoCon). Sochi, Russia: IEEE, 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867681.

Информация об авторе

Гайнутдинов Рустам Рафкатович – канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ, ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия.
E-mail: emc-kai@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-1973-2941

References

1. Paul C. R. Analysis of multiconductor transmission Lines. 2nd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2008. 800 p.

2. Paul C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2006. 1016 p.

3. Szpakowska-Peas E., Filipowicz M. Selected aspects of electronic hardware development and testing for the flight reconfiguration system in accordance with the RTCA DO-160G standard // Aircraft Engin. and Aerospace Technol. 2025. Vol. 97, no. 1. P. 28–36. doi: 10.1108/AEAT-03-2024-0083.

4. Kechiev L. N., Baljuk N. V. Zarubezhnye voennye standarty v oblasti JeMS. M.: Grifon, 2014. 448 s. (In Russ.).

5. Ott H. W. Electromagnetic compatibility engineering. Hoboken: Wiley, 2009. 872 p.

6. Gajnutdinov R. R., Chermoshencev S. F. Prognozirovanie vnutrisistemnoj jelektromagnitnoj sovmestimosti bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Vestn. Kazanskogo gos. tehn. un-ta im. A. N. Tupoleva. 2014. № 4. S. 124–130. (In Russ.).

7. Tesche F. M., Ianoz M. V., Karlsson T. EMC Analysis methods and computational models. New York: Wiley, 1997. 656 p.

8. Gaynutdinov R. R., Chermoshentsev S. F. Study of crosstalks in the cables of unmanned aerial vehicle // 2017 Intern. Siberian Conf. on Control and Commun. (SIBCON). Astana, Kazakhstan: IEEE, 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998540.

9. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II / K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan // IEEE Trans. Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6, no. 2. P. 182–197. doi: 10.1109/4235.996017.

10. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Chichester: Wiley, 2001. 518 p.

11. Pham D. T., Castellani M. The bees algorithm: Modelling foraging behaviour to solve continuous optimization problems // Proc. IMechE, Part C: J. Mechan. Engin. Sci. 2009. Vol. 223, no. 12. P. 2919–2938. doi: 10.1243/09544062JMES1494.

12. Coello Coello C. A., Lamont G. B., Van Veldhuizen D. A. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. 2nd ed. New York: Springer, 2007. 800 p.

13. Gajnutdinov R. R., Chermoshencev S. F. Metodologija issledovanija jelektromagnitnoj stojkosti tehnicheskih sistem pri vneshnih jelektromagnitnyh vozdejstvijah ot neskol'kih istochnikov // Izv. vuzov. Aviacionnaja tehnika. 2023. № 1. S. 135–141. (In Russ.).

14. Denman E. D., Beavers A. N. The matrix sign function and computations in systems // Appl. Math. and Comp. 1976. Vol. 2, no. 1. P. 63–94. doi: 10.1016/0096-3003(76)90020-5.

15. The bees algorithm – A novel tool for complex optimisation problems / D. T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi // Proc. 2nd Intern. Virtual Conf. on Intelligent Production Machines and Syst. (IPROMS 2006). Cardiff, UK: Elsevier Ltd, 2006. P. 454–459.

16. Gaynutdinov R., Suzdaltsev I. Genetic algorithm for optimization placement of antennas on aircraft // Intern. Russ. Automation Conf. (RusAutoCon). Sochi, Russia: IEEE, 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867681.

Information about the author

Rustam R. Gaynutdinov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Design Systems, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev–KAI, 10 K. Marks St., Kazan, 420111, Russia.
E-mail: emc-kai@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-1973-2941

Статья поступила в редакцию 27.08.2026; принята к публикации после рецензирования 21.09.2026; опубликована онлайн 27.11.2026.

Submitted 27.08.2026; accepted 21.09.2026; published online 27.11.2026.