УДК 629.5.06+621.315.2
EDN: HEMFSY

Е.В. Гусак
АО «Северное производственное объединение «Арктика», Северодвинск, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Объект и цель научной работы. Объект исследования – интеллектуальное проектирование судовых кабельных сетей. Целью является разработка математического и алгоритмического обеспечения методики интеллектуального проектирования судовых кабельных сетей.
Материалы и методы. Для учета требований к проектированию в работе применяются аналитические методы системного анализа. Для реализации алгоритмов использованы методы планирования движения (алгоритм быстрорастущих деревьев), линейного программирования (алгоритм последовательного улучшения плана) и метод разложения Данцига – Вульфа.
Основные результаты. Описаны этапы процесса проектирования кабельных сетей; формализованы задачи, решаемые на данных этапах. Разработаны алгоритм быстрорастущих деревьев для формирования маршрутной сети, алгоритм последовательного улучшения плана для построения маршрутов кабелей и подбора марок на маршрутной сети, а также алгоритм подбора устройств крепления.
Заключение. Процесс проектирования судовых кабельных сетей представлен в виде следующих шагов: заполнение кабельного журнала, построение маршрутной сети, построение маршрутов с подбором маркосечений кабелей и выбор устройств крепления. Разработано математическое и алгоритмическое обеспечение, применение которого в рамках интеллектуальной методики проектирования кабельных сетей способно повысить эффективность и качественность конечного результата.
Ключевые слова: проектирование, кабельные сети, маршрутная сеть, алгоритм быстрорастущих деревьев, транспортная задача, алгоритм последовательного улучшения плана, устройства крепления.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.06+621.315.2
EDN: HEMFSY

Ye.V. Gusak
Northern Production Association Arktika JSC, Severodvinsk, Russia

CODES AND ALGORITHMS FOR AI-BASED DESIGN OF MARINE CABLE GRIDS

Object and purpose of research. The purpose of this study was to develop codes and algorithms for AI-based design of marine cable grids.
Materials and methods. To meet design requirements, this work was performed as per the analytical methods of system analysis. The algorithms were implemented as per the methods of motion planning (in particular, Sapling Sowing and Growing (SSG) technique) and linear programming methods, e.g. simplex algorithm, Dantzig-Wolfe decomposition, etc.
Main results. The study describes the stages of cable grid design, formalizing design objectives for each stage. Cable grid was formed as per the SSG algorithm, and the simplex approach was used to develop cable routes, as well as to select proper cable designs and fixtures.
Conclusion. The study describes the stages of cable grid design, formalizing design objectives for each stage. Design process itself is represented as a totality of the following steps: filling out cable log; constructing cable grid; constructing

Для цитирования: Гусак Е.В. Математическое и алгоритмическое обеспечение интеллектуальной методики проектирования судовых кабельных сетей. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 4(410): 137–148.
For citations: Gusak Ye.V. Codes and algorithms for AI-based design of marine cable grids. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 4(410): 137–148 (in Russian).

cable route network with consideration of standard cable sections; selecting proper fixtures. The author has also developed appropriate codes and algorithms for AI-based design of marine cable grid to enhance efficiency and quality of the final result.
Keywords: design, cable grids, routes, SSG, transportation problem, simplex algorithm, fixtures.
The author declares no conflicts of interest.

Введение
Introduction

Проектирование судовых кабельных сетей, отвечающих современным стандартам качества и безопасности, а также эксплуатационным требованиям, является трудоемким процессом. Этот процесс выполняется итеративно, в несколько этапов, с постоянной конкретизацией требований к сети, и связан с принятием проектных решений, которые закрепляются в соответствующих конструкторских документах.

Большинство систем автоматизированного проектирования (САПР) автоматизируют данный процесс только в части выпуска конструкторских документов, но принятие конструкторских и проектных решений в большинстве систем требует полноценного участия проектанта, который стремится реализовать требования заказчика к судовой кабельной сети в проекте. В свою очередь обеспечить безопасность кабельных сетей, повысить экономическую эффективность их монтажа и эксплуатации, отказоустойчивость в экстремальных условиях могли бы улучшение существующих подходов и методик проектирования, а также разработка и внедрение новых перспективных решений.

Процесс проектирования с использованием интеллектуальных методов
AI-based design process

Процесс проектирования кабельной сети представляет собой постоянную конкретизацию проектной информации, построение и детализацию модели судна для разработки конструкторских документов, описывающих размещение электрооборудования и определяющих маршруты кабелей.

Проектирование кабельных сетей включено в общий процесс проектирования судна. Широко распространены следующие этапы проектирования: разработка технического задания; разработка технического предложения; создание эскизного проекта; создание технического проекта; создание рабочего проекта (причем последние два этапа часто не имеют границ и выполняются как один).

С точки зрения накопления информации по прокладке и монтажу судовых кабельных сетей достигнутый уровень детализации проекта находит отражение в выпускаемых на каждом этапе соответствующих конструкторских документах. Их перечень соответствует уже существующей нормативной базе, куда входят Единая система конструкторской документации (ЕСКД) [1] и ГОСТ 23897-79 [2]. Основными этапами проектирования для кабельных сетей при этом являются:

- создание эскизного проекта – выпускается конструкторская документация, являющаяся основой для планирования постройки судна, выбора технологических решений и расчета сметы проекта;
- создание технического и рабочего проектов – осуществляется построение компоновочной геометрии помещений судна, наполнения его оборудованием и прочим техническим оснащением в соответствии с требованиями размещения и прокладки кабельных сетей с учетом сечений и коллизий помещений.

Предлагаемые интеллектуальные алгоритмы и методы встраиваются в перечисленные этапы и выполняют с разной детализацией постепенное построение кабельной сети. На рис. 1 представлена общая схема процесса проектирования с применением разработанных интеллектуальных методов проектирования.

Кабельный журнал как основа процесса проектирования кабельных сетей
Cable log as cornerstone of cable grid design

Проектирование кабельных сетей начинается на ранних этапах эскизного проектирования, когда трехмерная модель корпуса судна еще не закончена, а оборудование не размещено. Разрабатывается кабельный журнал, где указываются подключения между помещениями и приборами. Предлагаемые методы построения маршрутов основываются на данном документе и предполагают внесение дубликатов марок кабелей для последующего выбора путем решения транспортной задачи. При этом указываются только номера помещений, а не конечные координаты оборудования, и маршруты прокладываются до центров помещений.

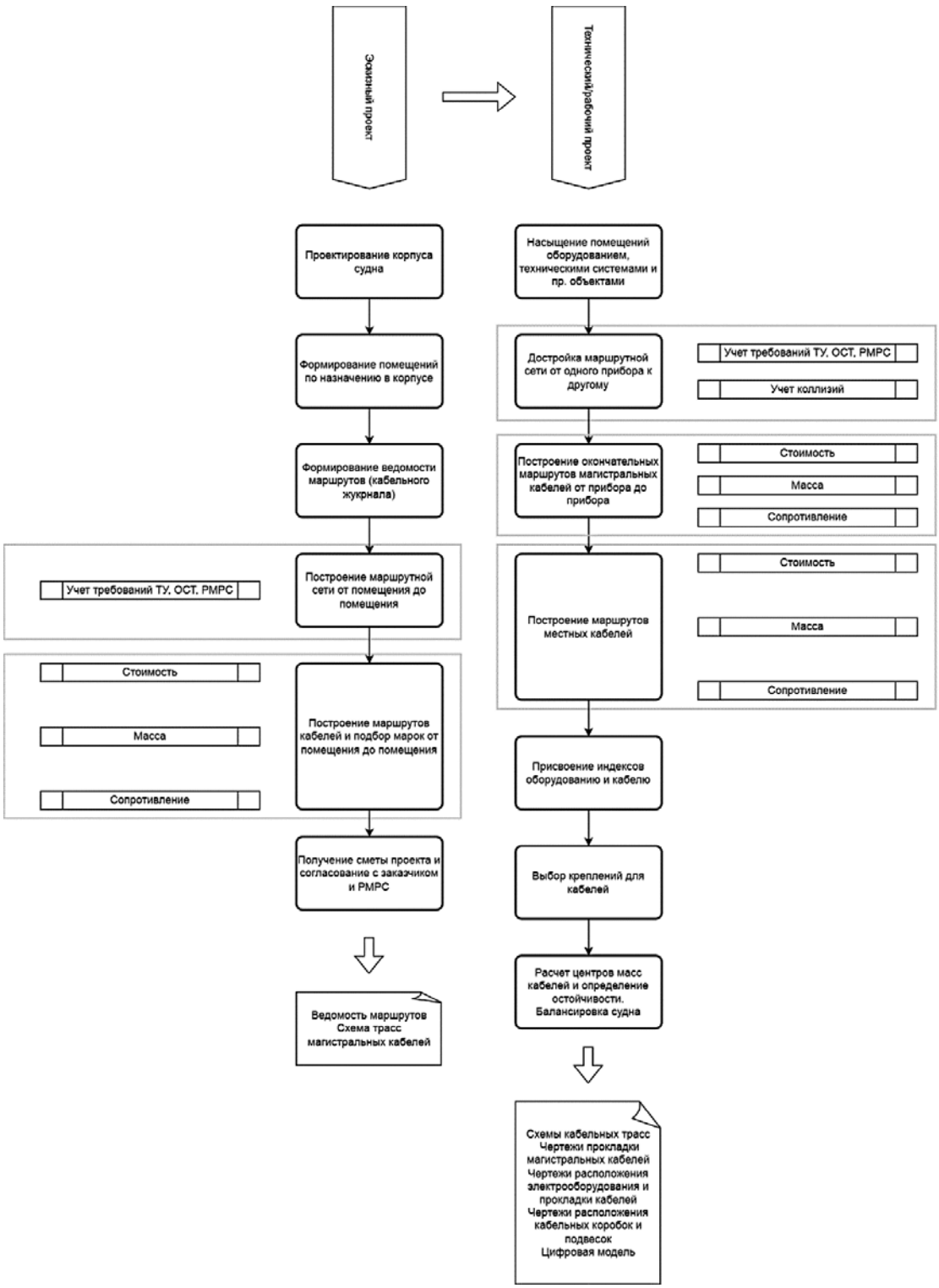

Рис. 1. Схема процесса проектирования с применением методов интеллектуального проектирования
Fig. 1. Flow chart of AI-based design process

На этапах технического и рабочего проектирования проводится детальная проработка геометрии помещений, размещение оборудования с привязкой к координатам и прокладка кабелей. В кабельный журнал добавляются сечения кабелей и новые варианты марок, соответствующие изменившимся требованиям. Для выбранных марок кабелей назначается подходящее сечение, после чего определяется оптимальный маршрут между точками подключения. Кабельные сети приобретают соответствующую геометрическую форму с учетом выбранных типоразмеров креплений.

Представление кабельной сети в виде маршрутной сети

Cable grid representation in form of route network

Для представления кабельной сети удобнее всего использовать граф. Кабельная сеть – это множество кабелей, размещенных на маршрутной сети для подключения приборов [3, 4]. Маршрутная сеть отображает допустимые варианты размещения кабелей. Для ее построения в проектном пространстве лучше всего применять алгоритм быстрорастущих деревьев с эвристикой, который учитывает большинство ограничений на прокладку кабеля на этапе поиска вариантов размещения. Это уменьшает количество ограничений при построении кабельной сети, позволяя сосредоточиться на поиске оптимального решения.

В терминах теории графов маршрутная сеть представляет собой конечный неориентированный связный граф $G(N, E)$, который может быть уложен в трехмерное пространство [5]. Маршрутный граф задают множество узлов $N = \{i = 1{:}|N|,\ |N| = n\}$, представляющих собой уплотнительные конструкции с переборками или палубами судна, точки подключения к электрооборудованию и разветвления кабельной сети, отвечающие требованиям к прокладке кабелей, и множество неориентированных ребер E, соединяющих каждую конкретную пару узлов $n_i, n_j \in N$, где $(n_i, n_j) = (n_j, n_i)$, $n_i \neq n_j$.

Множеству ребер соответствует матрица расстояний $L(N, N)$, в которой хранятся значения длин для ребер E маршрутного графа G. Элементы $l[i, j]$ матрицы расстояний L определяются как: $l[i, j] = 0$ – если $i = j$, $l[i, j] = \infty$ – если $i \neq j$ и узлы не смежные, $l[i, j] = l_{i,j}$ – если $i \neq j$ и узлы смежные ($l_{i,j}$ – расстояние между смежными узлами i и j).

Также каждому ребру (i, j) множества E соответствует вектор пропускных способностей $D[E] = (d_{12}, d_{23}, \ldots, d_{ij})$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$, в элементы d_{ij} которого записывается значение пропускной способности ребер (i, j) по сечению кабеля. Пропускная способность определяет, сколько кабелей с определенным сечением может быть пропущено по ребру (i, j) маршрутной сети $G(N, E)$, и определяется по данным о пространственных коллизиях на пути прохождения ребра.

Применение алгоритма быстрорастущих деревьев с эвристикой для построения маршрутной сети

Route network construction as per heuristic SSG algorithm

В соответствии с маршрутным методом декомпозиции проектного пространства рассмотрим его конфигурацию [6]. Пусть у нас есть евклидово трехмерное проектное пространство P, $P \subset \mathbb{E}^N$, $N = 3$. Также задано подмножество коллизий $0 \subset P$, представляющее препятствия для прокладки кабеля: габаритное электрооборудование, вентиляционные трубы и т.д.

Возможные варианты прокладки кабельных трасс, присоединяемых к маршрутной сети $G(N, E)$, определяет агент $A\langle J, b_h\rangle$. На перемещение агента накладываются ограничения $J_A = \{J_{A_1}(c), J_{A_2}(c), \ldots, J_{A_k}(c)\}$, принимающие значения «истина» или «ложь» в зависимости от конфигурации c. Агент A определяется шаблоном крепления кабеля b_h с заданной ориентацией в P, габаритами и пропускной способностью d_h, выбираемыми из множества шаблонов $B = \{b_1, b_2, \ldots, b_h, \ldots\}$, $B \subset P$. Конфигурация $c \in C_A$ представляет параметры, определяющие положение агента A в проектном пространстве P, а пространство состояний агента C_A задает эти параметры.

Для генерации маршрутной сети в проектном пространстве P проектировщик задает пространство состояний окружения $C_{env} = \{C_{free}, C_{obj}, C_{hazard}\}$, которое включает:

- Пространство допустимых состояний C_{free} – множество всех конфигураций c пространства состояний агента C_A, определенных для $P_{free} \subset P$ и удовлетворяющих ограничениям на перемещение $J_{A_1}(c) \wedge J_{A_2}(c) \wedge \ldots \wedge J_{A_k}(c) = True$ и исключающих столкновение с коллизиями проектного пространства $A(c) \cap 0 = \varnothing$ Сюда включены допустимые для прокладки борты, переборки,

настилы, подволоки и подобшивочное пространство палуб или помещений судна

$$C_{free} = \{c \in C_A,\ J_{A_1}(c) \wedge J_{A_2}(c) \wedge ... \wedge \wedge J_{A_k}(c),\ A(c) \cap 0 = \emptyset\}.$$

- Пространство конфигураций коллизий C_{obj} – множество конфигураций $c \notin C_A$, через которые нельзя осуществлять прокладку кабелей

$$C_{obj} = \{c_{obj} \notin C_A,\ A(c) \cap 0 = \emptyset\}.$$

- Пространство состояний эксплуатационных рисков C_{hazard} – множество конфигураций c пространства состояний агента C_A, определяемых проектировщиком на проектном пространстве $P_{hazard} \subset P$ и требующих учета агентом дополнительных ограничений на прокладку кабелей $J_{hazard} = \{J_{H_1}(c),\ J_{H_2}(c),\ ...,\ J_{H_k}(c)\}$ и исключающих столкновение с коллизиями проектного пространства

$$C_{hazard} = \{c \in C_A,\ J_A \wedge J_{hazard},\ A(c) \cap 0 = \emptyset\}.$$

Тогда маршрутная сеть представляет собой граф $G(N, E)$, где узлы N включают допустимые конфигурации перемещений агента $C_A \subset C_{free}$ или $C_A \subset C_{hazard}$, а ребра M соответствуют бесконфликтным переходам между узлами. Ограничения на прокладку кабелей в зонах эксплуатационных рисков J_{hazard} включают ограничения на передвижение агента A, которое должно происходить только в пределах определенных пространств состояний $C_A \subset \{C_{free}, C_{hazard}\}$. Агент должен прокладывать ребро $e_q = (n_i, n_j)$ только в пределах заданной плоскости, чтобы обеспечить правильное прохождение кабельной трассы.

Многонаправленный алгоритм быстрорастущих деревьев с эвристикой применяется как на этапе эскизного проекта, при построении первоначальной модели корпуса судна и размещении узлов подключения кабеля, так и на этапах технического и рабочего проекта, при детализации модели и окончательном построении кабельной сети. Для последних построение маршрутной сети $G(N, E)$ происходит на базе эскизной сети $G_{sketch}(N, E)$ с расчетом пропускной способности ребер путем подбора шаблонов креплений B с вместимостью D_{brace}, когда на этапе эскизного проекта этого не делается.

Алгоритм принимает на вход конфигурацию проектного пространства C_{env}, предполагаемую стоимость оптимального пути Q_{opt}, множество узлов подключения V, множество шаблонов кабельных креплений B с вместимостью D_{brace}, шаг перемещения агента ε и $G_{sketch}(N, E)$ для достроения маршрутной сети на поздних этапах. На рис. 2 представлена блок-схема многонаправленного алгоритма быстрорастущих деревьев, использующегося для построения маршрутной сети $G(N, E)$ в проектном пространстве судна.

Построение кабельной сети

Route network generation

Построение кабельной сети заключается в поиске маршрута для соединения двух приборов в маршрутной сети $G(N, E)$ с выбором марки кабеля, учитывающей ограничение на сопротивление.

Пусть задано множество соединений $W = \overline{1, |W|}$, где h-е соединение устанавливает кабельную связь между парами точек маршрутной сети $w_h = (n_i, n_j)$, представляющими собой электрооборудование, уплотнительные конструкции и пр. в проектном пространстве $n_i \equiv v_i$, $n_j \equiv v_j$, $v_i, v_j \in V$.

Для каждого соединения $w_h \in W$ определяется список допустимых вариантов марок кабеля $T_h = \{t_m^h(\varphi_m^h, \delta_m^h, \rho_m^h, s_m^h)\}$, $T_h = \overline{1, |T^h|}$, определяющих m-ю допустимую марку кабеля для h-го соединения, и в котором задаются такие характеристики каждой марки как $\varphi_m{}^h$ – удельный вес m-й марки h-го соединения (кг/м), $\delta_m{}^h$ – удельная стоимость m-й марки h-го соединения (стоимость 1 м), $\rho_m{}^h$ – удельное сопротивление m-й марки h-го соединения (Ом·мм^2/м), $s_m{}^h$ – площадь поперечного сечения m-й марки h-го соединения (мм^2).

При наложении соединений и соответствующих им марок кабелей на маршрутную сеть $G(N, E)$ и оценки оптимальности построенных маршрутов формируются матрицы стоимостей $\mathcal{C}_m^h(N, N)$ и масс $\mathcal{A}_m^h(N, N)$.

Матрицы стоимостей $\mathcal{C}_m^h(N, N)$ хранят значение общей стоимости h-го соединения m-й марки кабеля длины $l_m{}^h$, прокладываемого по маршрутному графу $G(N, E)$. Элементы $c_m{}^h[i, j]$ матрицы стоимостей $\mathcal{C}_m^h$ находятся через длину l_{ij} по формуле:

$$c_{ij}^{hm} = \delta_m^h l_{ij},$$

где δ_m^k – удельная стоимость m-й марки h-го соединения, l_{ij} – длина ребра (i, j), по которой проходит m-я марка h-го соединения.

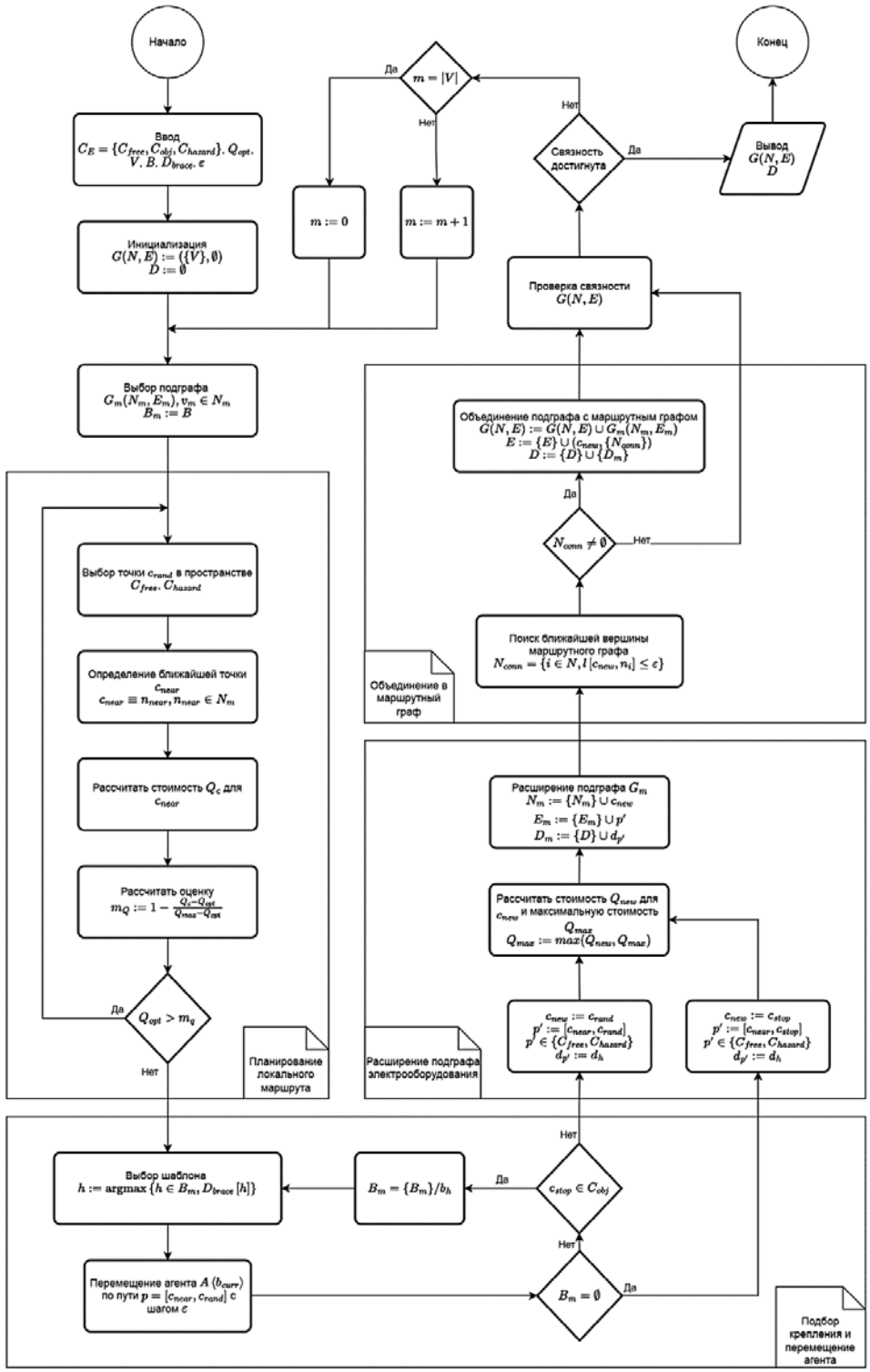

Рис. 2. Блок-схема многонаправленного алгоритма быстрорастущих деревьев для построения маршрутной сети
Fig. 2. Flow chart of multi-directional RRT algorithm for route network generation

Матрица масс $\mathcal{A}_m^h(N, N)$ хранит значение массы h-го соединения m-й марки кабеля длины $l_m{}^h$, прокладываемого по маршрутному графу $G(N, E)$. Элементы $a_m{}^h[i, j]$ матрицы масс $\mathcal{A}_m^h$ находятся через длину l_{ij}^{hm} по формуле:

$$a_{ij}^{hm} = \varphi_m^h \, l_{ij},$$

где φ_m^k – удельная стоимость m-й марки h-го соединения, l_{ij} – длина ребра (i, j), по которой проходит m-я марка h-го соединения.

Поскольку определен список соединений $W = \{\ldots, w_h = (n_i, n_j), \ldots\}$, описывающий, от какого прибора к какому осуществляется подключение, то для нахождения маршрута вводится вектор ограничений по интенсивности потока $B = (b_{12}^{11}, b_{23}^{12}, b_{34}^{21}, ..., b_i^{hm})$. Элемент вектора ограничений b_i^{hm} принимает значения

$$b_i^{hm} = \begin{cases} s_{hm}, \text{ если } i\text{-узел является начальным} \\ \quad \text{для } k\text{-го кабеля;} \\ -s_{hm}, \text{ если } i\text{-узел является конечным} \\ \quad \text{для } k\text{-го кабеля;} \\ 0, \text{ если } i\text{-узел не является ни начальным,} \\ \quad \text{ни конечным для } k\text{-го кабеля,} \end{cases}$$

где s_{hm} – площадь поперечного сечения m-й марки кабеля h-го соединения.

Через x_{ij}^{hm} обозначается поток h-го соединения m-й марки из узла i в узел j, который принимает значение $x_{ij}^{hm} = s_{hm}$, если маршрут m-й марки h-го соединения проходит через ребро (i, j), $x_{ij}^{hm} = 0$ – в противном случае.

Для учета допустимого сопротивления введем в рассмотрение вектор ограничений по допустимым значениям сопротивления $R = (r_1, r_2, \ldots, r_h, \ldots)$, $R = \overline{1, |W|}$, в котором для каждого h-го соединения в соответствие приводится значение допустимого сопротивления r_h. Сопротивление m-й марки h-го соединения на отрезке (i, j) можно найти по формуле:

$$r_{ij}^{hm} = \rho_m^h \frac{l_{ij}}{x_{ij}^{hm}},$$

где r_{ij}^{hm} – удельное сопротивление m-й марки h-го соединения для ребра (i, j) (Ом·мм^2/м).

С учетом приведенных обозначений задачу нахождения маршрутов соединения и подбора марок кабелей на маршрутной сети $G(N, M)$ с ограничениями на пропускные способности ребер можно сформулировать в терминах двухкритериальной транспортной задачи линейного программирования:

$$\min F(X) = \begin{pmatrix} f_1(X) = \sum\limits_{h=1}^{|W|} \sum\limits_{m=1}^{|T_h|} \sum\limits_{(i,j)\in E}^{q} c_{ij}^{hm} x_{ij}^{hm} \\ f_2(X) = \sum\limits_{h=1}^{|W|} \sum\limits_{m=1}^{|T_h|} \sum\limits_{(i,j)\in E}^{q} a_{ij}^{hm} x_{ij}^{hm} \end{pmatrix}$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_{j:(i,j)\in E}^{q} x_{ij}^{hm} - \sum_{j:(i,j)\in E}^{q} x_{ji}^{hm} = b_i^{hm}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n},$$
$$h = \overline{1, |W|}, \quad m = \overline{1, |T_h|};$$

$$\sum_{h=1}^{|W|} \sum_{m=1}^{|T_h|} x_{ij}^{hm} \le d_{ij}^m, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \quad h = \overline{1, |W|},$$
$$m = \overline{1, |T_h|};$$

$$\sum_{(i,j)\in E}^{q} \rho_m^h \frac{l_{ij}}{x_{ij}^{hm}} \le r_m^h, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \quad h = \overline{1, |W|},$$
$$m = \overline{1, |T_h|};$$

$$x_{ij}^{hm} \ge 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}, \quad h = \overline{1, |W|}, \quad m = \overline{1, |T_h|}.$$

Путем выполнения преобразований с помощью метода разложения Данцига – Вульфа, сделанных в [7], получаем λ-задачу, которая заключается в нахождении вектора λ_γ^{hm}, удовлетворяющего следующим условиям:

$$\min F(\lambda) = \begin{pmatrix} \sum\limits_{h=1}^{|W|} \sum\limits_{m=1}^{|T_h|} \sum\limits_{\gamma=1}^{v_{hm}} \psi_{ij}^\gamma \lambda_\gamma^{hm} \\ \sum\limits_{h=1}^{|W|} \sum\limits_{m=1}^{|T_h|} \sum\limits_{\gamma=1}^{v_{hm}} \varphi_{ij}^\gamma \lambda_\gamma^{hm} \end{pmatrix},$$

$$\sum_{h=1}^{|W|} \sum_{m=1}^{|T_h|} \sum_{\gamma=1}^{v_{hm}} \sigma_{ij}^\gamma \lambda_\gamma^{hm} + s_{ij}^\gamma = d_{ij}^m, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n},$$
$$h = m = \overline{1, |T_h|},$$

$$\sum_{\gamma=1}^{v_{hm}} \lambda_\gamma^{hm} = 1,$$

$$\lambda_\gamma^{hm} \ge 0, \quad \gamma = \overline{1, v},$$

где $\psi_{ij}^{\gamma} = \left(\sum_{(i,j)\in E}^{q} c_{ij}^{hm} \,\|\, \pi_{ij}^{hm} \,\|_{\gamma}^{hm} \right)$,

$\varphi_{ij}^{\gamma} = \left(\sum_{(i,j)\in E}^{q} a_{ij}^{hm} \,\|\, \pi_{ij}^{hm} \,\|_{\gamma}^{hm} \right)$,

$\sigma_{ij}^{\gamma} = \left(\sum_{(i,j)\in E}^{q} (a_{ij}^{hm})^{(1)} \,\|\, \pi_{ij}^{hm} \,\|_{\gamma}^{hm} \right)$.

Из λ-задачи в соответствии с признаком оптимальности двойственной к ней задачи можно вывести X_u^k-задачу дробно-линейного программирования, в которой для каждого кабеля $k = (h, m)$ требуется вычислить

$$\max F(x^k) = \sum_{(i,j)\in E}^{q} \frac{-\left((a_{ij}^k - u_{ij}^a)x_{ij}^k - u_0^a\right)}{\left((c_{ij}^k - u_{ij}^c)x_{ij}^k - u_0^c\right) - \left((a_{ij}^k - u_{ij}^a)x_{ij}^k - u_0^a\right)}$$

при ограничениях

$$\sum_{j:(i,j)\in E}^{q} x_{ij}^k - \sum_{j:(i,j)\in E}^{q} x_{ji}^k = b_i^k, \quad i = \overline{1,n}, \quad j = \overline{1,n}, \quad k = \overline{1,o};$$

$$\sum_{(i,j)\in E}^{q} \rho_k \frac{l_{ij}}{x_{ij}^k} + s_{ij}^k = r_k, \quad i = \overline{1,n}, \quad j = \overline{1,n}, \quad k = \overline{1,o};$$

$$(c_{ij}^k - u_{ij}^c)x_{ij}^k - u_0^c \geq 0, \quad i = \overline{1,n}, \quad j = \overline{1,n}, \quad k = \overline{1,o};$$

$$(a_{ij}^k - u_{ij}^a)x_{ij}^k - u_0^a < 0, \quad i = \overline{1,n}, \quad j = \overline{1,n}, \quad k = \overline{1,o};$$

$$s_{ij}^k, \; x_{ij}^k \geq 0, \quad i = \overline{1,n}, \quad j = \overline{1,n}, \quad k = \overline{1,o}.$$

где $c_{ij}^k - u_{ij}^c$, $a_{ij}^k - u_{ij}^a$ – коэффициенты линейной формы $X_{u^{c,a}}^k$-задачи; u_{ij}^c, u_{ij}^a – относительные оценки условий задачи.

Применение алгоритма последовательного улучшения плана для решения двухкритериальной задачи построения маршрутов и подбора марок кабелей

Application of simplex algorithm to solve bi-criterial cable routing problem and brand selection

Для решения двухкритериальной постановки транспортной задачи предлагается использовать измененный алгоритм последовательного улучшения плана [8]. В описанной постановке для построения маршрутов кабелей и подбора марок учитываются пропускная способность ребер и сечение кабелей. На этапе эскизного проекта, когда детализация судна недостаточна, эти параметры не учитываются: площадь поперечного сечения всех марок кабелей s_{hm} принимается равной 1, а пропускная способность ребер $d_{ij} = \infty$. При этом удельный вес, удельная стоимость и удельное сопротивление должны быть указаны.

На этапах технического и рабочего проектов в кабельный журнал вносится информация о площади поперечного сечения кабелей s_{hm}, а алгоритмом быстрорастущих деревьев присваивается пропускная способность ребер d_{ij}. Алгоритм последовательного улучшения плана использует эти данные для окончательного подбора маршрутов и марок кабелей, дорабатывая опорный план размещения и подобранных марок магистральных кабелей $\{X'_{main}\}$ с этапа эскизного проекта.

Алгоритм последовательного улучшения плана принимает на вход: множество соединений W, множество марок кабеля T, вектор пропускных способностей дуг кабеля D, матрицу длин ребер сети L, вектор ограничений по интенсивности потока B, вектор ограничений на допустимое сопротивление R и дополнительно опорный план $\{X'_{main}\}$. На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма решения задачи маршрутизации кабелей с подбором марок, основанного на методе последовательного улучшения плана и методе разложения.

Расчет и применение алгоритма выбора типовых кабельных подвесок

Calculation and application of selection algorithm for standard cable fixtures

После построения маршрутов кабелей необходимо выбрать типовые конструкции для их крепления к элементам корпуса судна. Расчет и выбор типоразмеров кабельных креплений $B = \{b_1, \ldots, b_n\}$, $n = \overline{1, |B|}$ производится после определения маршрутов кабелей в сети $G(N, E)$, когда они вписываются в проектное пространство P. Для ребра маршрутной сети $(i, j) \in E$ определен вектор сечений пучков проходящих по нему кабелей $K_{ij} = \{s_1, \ldots, s_k\}_{ij}$, $k = \overline{1, |K_{ij}|}$, который находится путем преобразования построенного оптимального плана X'. Каждому кабелю в пучке соответствуют продольная жесткость $Q = \{q_1, \ldots, q_k\}$ и погонный вес $\Phi = \{\varphi_1, \ldots, \varphi_k\}$.

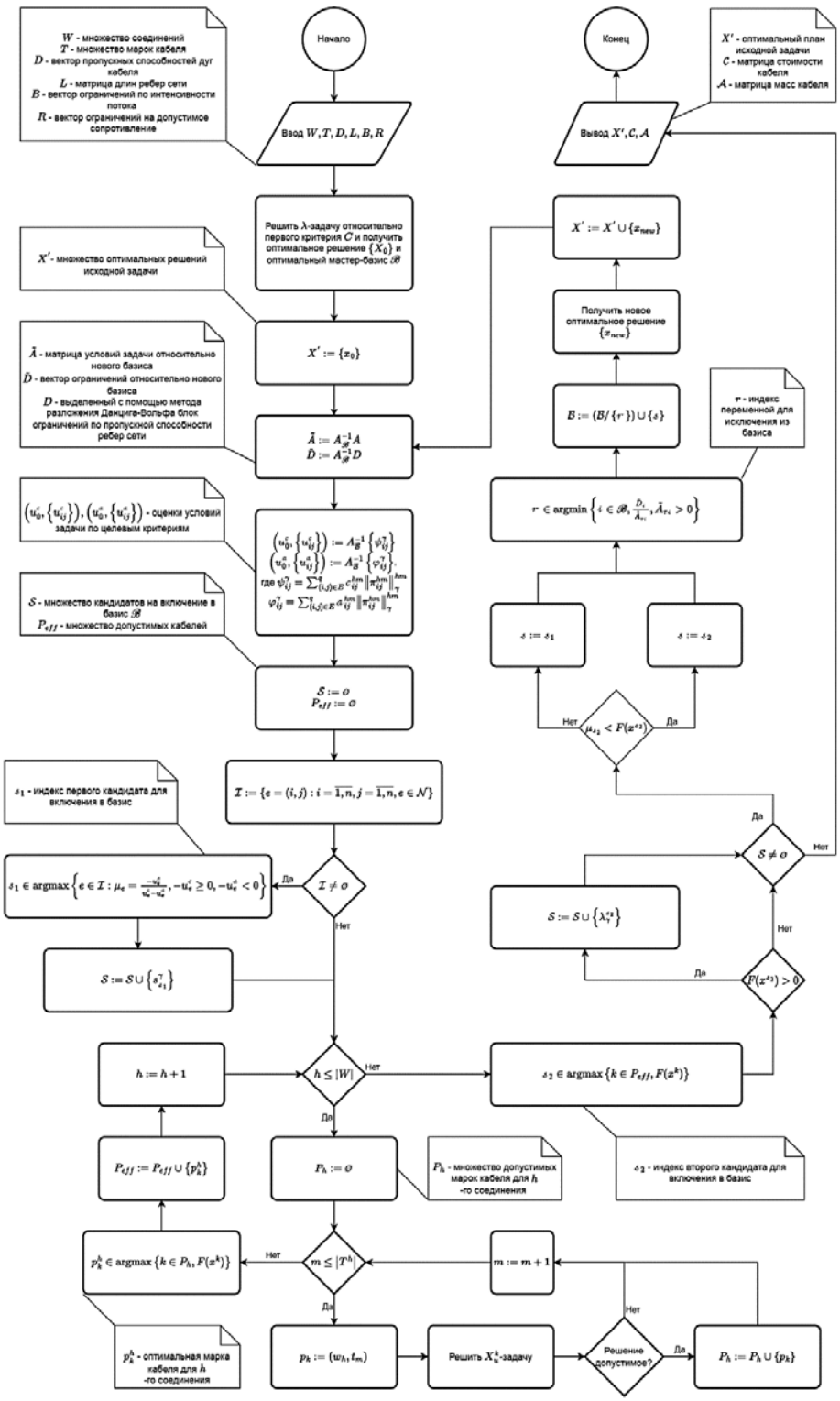

Рис. 3. Блок-схема алгоритма решения задачи маршрутизации кабелей с подбором марок
Fig. 3. Flow chart for solution algorithm of cable routing problem with selection of brands

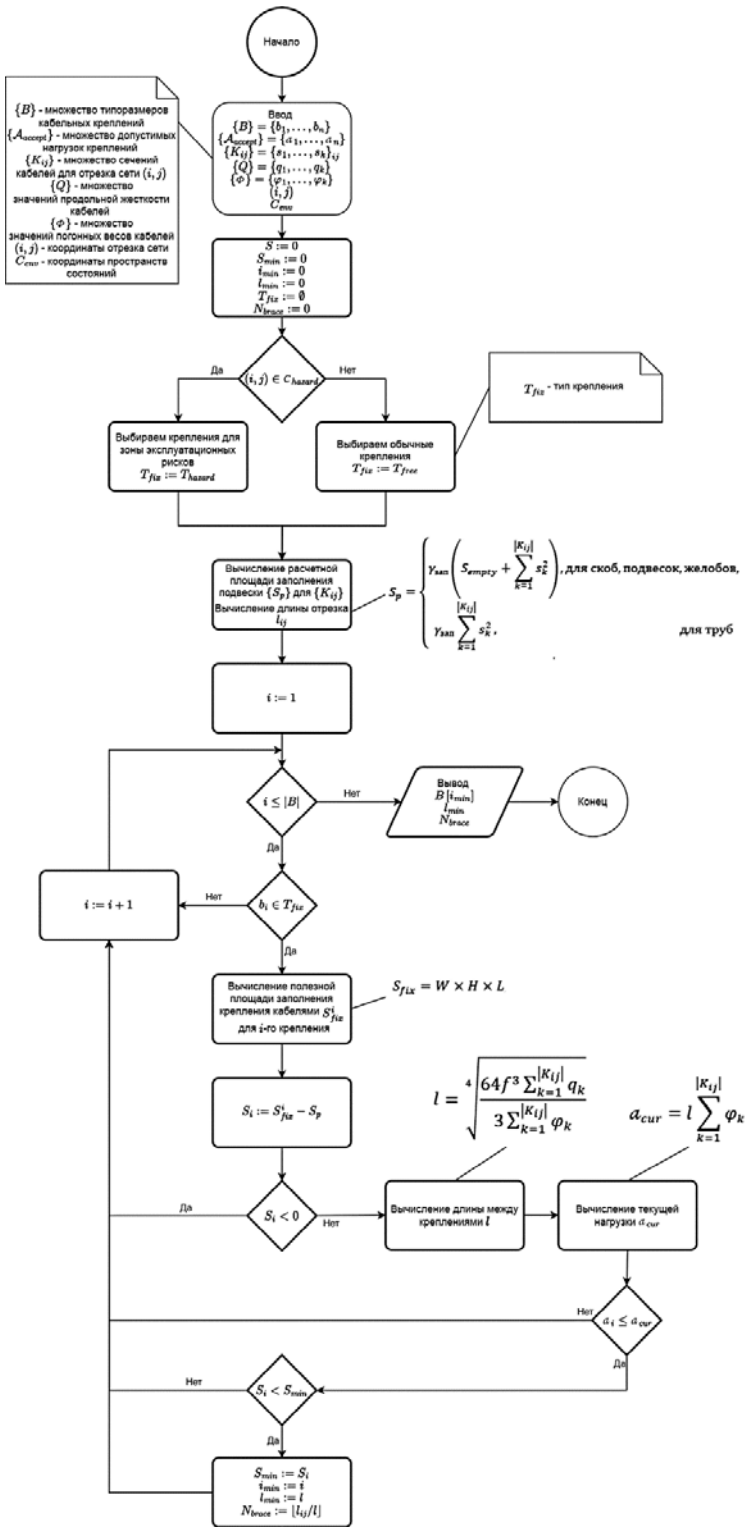

Рис. 4. Блок-схема алгоритма выбора типовых кабельных креплений
Fig. 4. Flow chart of selection algorithm for standard cable fixtures

Определение типового крепления для пучка кабелей K_{ij} производится путем вычисления S_p – расчетной площади заполнения крепления кабелями:

$$S_p = \begin{cases} \gamma_{\text{зап}} \left(S_{empty} + \sum_{k=1}^{|K_{ij}|} s_k^2 \right), \text{ для скоб, подвесок, желобов;} \\ \gamma_{\text{зап}} \sum_{k=1}^{|K_{ij}|} s_k^2, \text{ для труб,} \end{cases}$$

где $\gamma_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса, s_k – сечение k-го кабеля в подвеске, мм, S_{empty} – приблизительное значение площади незаполнения крепления S_{empty} для пучка кабелей K_{ij}, которое вычисляется по формуле

$$S_{empty} = \sum_{k=1}^{|K_{ij}|} \left(s_k^2 - \frac{\pi s_k^2}{4} \right).$$

Коэффициент запаса $\gamma_{\text{зап}}$ отвечает за запас площади самого крепления, оставляемый для дальнейшей модернизации или ремонта в соответствии с требованиями [9]:

$$\gamma_{\text{зап}} = \begin{cases} 1,2, \text{ для скоб, подвесок, желобов;} \\ 1,25, \text{ для труб при } |K_{ij}| = 1; \\ 2,4, \text{ для труб при } |K_{ij}| > 1. \end{cases}$$

Для каждого крепления B определяется допустимая нагрузка $\mathcal{A}_{accept} = \{a_1, ..., a_n\}$, которая указывается в ТУ соответствующего крепежного изделия. Для определения подходящего крепления нагрузка n-го крепления α_n сравнивается с действующей весовой нагрузкой кабелей, вычисляемой по формуле:

$$\mathcal{A}_{accept} \geq l \sum_{k=1}^{n} \varphi_k,$$

где $\mathcal{A}_{accept}$ – допустимая нагрузка по ТУ, φ_k – погонный вес k-го кабеля в пучке.

В качестве длины пролета трассы между двумя кабельными креплениями l для формулы берется длина, выраженная из формулы расчета провисания для трассы [10–12]:

$$l = \sqrt[4]{\frac{64 f^3 \sum_{k=1}^{|K_{ij}|} q_k}{3 \sum_{k=1}^{|K_{ij}|} \varphi_k}},$$

где q_k – продольная жесткость k-го кабеля в пучке, φ_k – погонный вес k-го кабеля в пучке, f – допускаемое провисание в середине трассы, которое берется равным f = 30 мм.

Разработанный алгоритм выбора типовых кабельных креплений осуществляет подбор креплений в соответствии с описанной моделью. На вход алгоритм принимает: список типовых кабельных креплений $B = \{b_1, \ldots, b_n\}$ с типоразмерами, множество допустимых нагрузок на крепления $\mathcal{A}_{accept} = \{a_1, ..., a_n\}$, вектор сечений пучков кабелей $K_{ij} = \{s_1, \ldots, s_k\}_{ij}$, вектор продольной жесткости кабелей $Q = \{q_1, \ldots, q_k\}$, вектор погонных весов кабелей $\Phi = \{\varphi_1, \ldots, \varphi_k\}$, координаты отрезка (i, j) в евклидовом пространстве и координаты пространств состояний C_{env}. На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма выбора типовых кабельных креплений.

Заключение

Conclusion

В связи с постоянно растущими требованиями процесс проектирования судовых кабельных сетей требует разработки новых подходов и методик проектирования, которые бы обеспечивали безопасность и отказоустойчивость судов, а также экономическую эффективность их постройки.

Описанное математическо-алгоритмическое обеспечение в рамках эскизного и технического рабочего этапов проектирования разбивают непосредственно процесс проектирования кабельных сетей на следующие шаги:

- заполнение кабельного журнала;
- построение маршрутной сети с помощью алгоритма быстрорастущих деревьев;
- построение маршрутов с подбором маркосечений кабелей с помощью алгоритма последовательного улучшения плана;
- выбор устройств крепления с помощью алгоритма подбора устройств крепления.

В дальнейшем целесообразно провести работы, направленные на совершенствование модельно-алгоритмического обеспечения и создания программного обеспечения, интегрируемого в САПР, в рамках представленного подхода к проектированию кабельных сетей.

Список использованной литературы

1. ГОСТ 2.001-2013. Единая система конструкторской документации. Общие положения. Москва : Стандартинформ, 2014. II, 6 с.
2. Рабочие конструкторские документы судостроительной верфи. Основные требования : ГОСТ 23888-79 : межгосударственные стандарты. Москва : Стандартинформ, 2017. 85 с.

3. *Гусак Е.В., Гурьев А.Т.* Использование маршрутной сети для представления корабельных кабельных трасс // Евразийский союз ученых. Серия: технические и физико-математические науки. 2023. № 1(104). С. 12–17.
4. *Бердичевский Л.Д., Марченко В.А.* Автоматизированное проектирование судовых кабельных сетей. Ленинград : Судостроение, 1978. 214 с.
5. *Асанов М.О., Баранский В.А., Расин В.В.* Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы. Ижевск : НИЦ «РХД», 2001. 287, [1] с.
6. *LaValle S.M.* Planning Algorithms. Cambridge : Cambridge university press, 2006. 826 p. DOI: 10.1017/CBO9780511546877.
7. *Гусак Е.В., Гурьев А.Т.* Модель построения судовых кабельных сетей и метод их уточнения на этапе постройки // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2, ч. 1. С. 63–72. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.007.
8. *Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б.* Специальные направления в линейном программировании. Москва : Красанд, 2018. 526 с.
9. *Адашев В.С., Розенберг Ю.А., Павлов В.В.* Справочник судового электротехника : в 3 т. Т. 3: Технология электромонтажных работ. Ленинград : Судостроение, 1980. 263 с.
10. Выбор расстояний между опорами при прокладке силовых кабелей с алюминиевой оболочкой в воздухе / *В.В. Болотин, И.А. Авиновицкий, В.Л. Благонадеждин, Г.Е. Хромченко* // Электричество. 1961. № 5. С. 9–12.
11. *Меркин Д.Р.* Введение в механику гибкой нити. Москва : Наука, 1980. 240 с.
12. *Busby R.F.* Manned Submersibles. Suitland : Office of the Oceanographer of the Navy, 1976. 764 p.

References

1. Standard GOST 2.001-2013. Unified System for Design Documentation. General Provisions. Moscow : Standartinform, 2014. II. 6 p. (*in Russian*).
2. Working design documents of shipbuilding yard. Main requirements. GOST 23888-79 – GOST 23897-79: international standards. Moscow : Standartinform, 2017. 85 p. (*in Russian*).
3. *Gusak Ye.V., Guryev A.T.* Marine cable grid representation in form of route network // *Eurasian Union of Scientists. Series: Technical and Physical & Mathematical Sciences*. 2023. Vol. 1(104). P. 12–17 (*in Russian*).
4. *Berdichevsky L.D., Marchenko V.A.* Computer-aided design of marine cable grids. Leningrad : Sudostroyenie, 1978. 214 p. (*in Russian*).
5. *Asanov M.O., Baranovsky V.A., Rasin V.V.* Discrete mathematics: graphs, matroids, algorithms. Izhevsk : RKhD Research & Engineering Centre, 2001. 287, [1] p. (*in Russian*).
6. *LaValle S.M.* Planning Algorithms. Cambridge : Cambridge university press, 2006. 826 p. DOI: 10.1017/CBO9780511546877.
7. *Gusak Ye.V., Guryev A.T.* Routing model and route refinement methods for marine cables at construction stage // *Marine Intellectual Technologies.* 2024. Vol. 2, Part 1. P. 63–72. DOI: 10.37220/MIT.2024.64.2.007 (*in Russian*).
8. *Golstein Ye.G., Yudin D.B.* Special applications of linear programming. Moscow : Krasand, 2018. 526 p. (*in Russian*).
9. *Adashev V.S., Rozenberg Yu.A., Pavlov V.V.* Marine Electrician's Handbook. In 3 vol. Vol. 3 : Electric Installation Technology. Leningrad : Sudostroyenie, 1980. 263 p. (*in Russian*).
10. *Bolotin V.V., Avinovitsky I.A., Blagonadezhdin V.L., Khromchenko G.E.* Selection of intervals between supports of overhead power cables with aluminum shell // *Elektrichestvo* (Electricity). 1961. Vol. 5. P. 9–12 (*in Russian*).
11. *Merkin D.R.* Introduction to flexible filament mechanics. Moscow : Nauka, 1980. 240 p. (*in Russian*).
12. *Busby R.F.* Manned Submersibles. Suitland : Office of the Oceanographer of the Navy, 1976. 764 p.

Сведения об авторе

Гусак Евгений Витальевич, инженер-программист отдела внедрения и сопровождения информационных систем АО «Северное производственное объединение «Арктика». Адрес: 164500, Россия, Архангельская область, г. Северодвинск, Архангельское шоссе, д. 34. E-mail: alphaplayer@yandex.ru.

About the author

Yevgeny V. Gusak, Programming Engineer, Department of Introduction and Support of IT systems, Northern Production Association Arktika JSC. Address: 34, Arkhangelskoye sh., Severodvinsk, Arkhangelsk, Russia, post code 164500. E-mail: alphaplayer@yandex.ru.

Поступила / Received: 11.06.24
Принята в печать / Accepted: 13.11.24