

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.942

### СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СИНТЕЗА ФИЗИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИИ СЕТИ СБОРА И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА

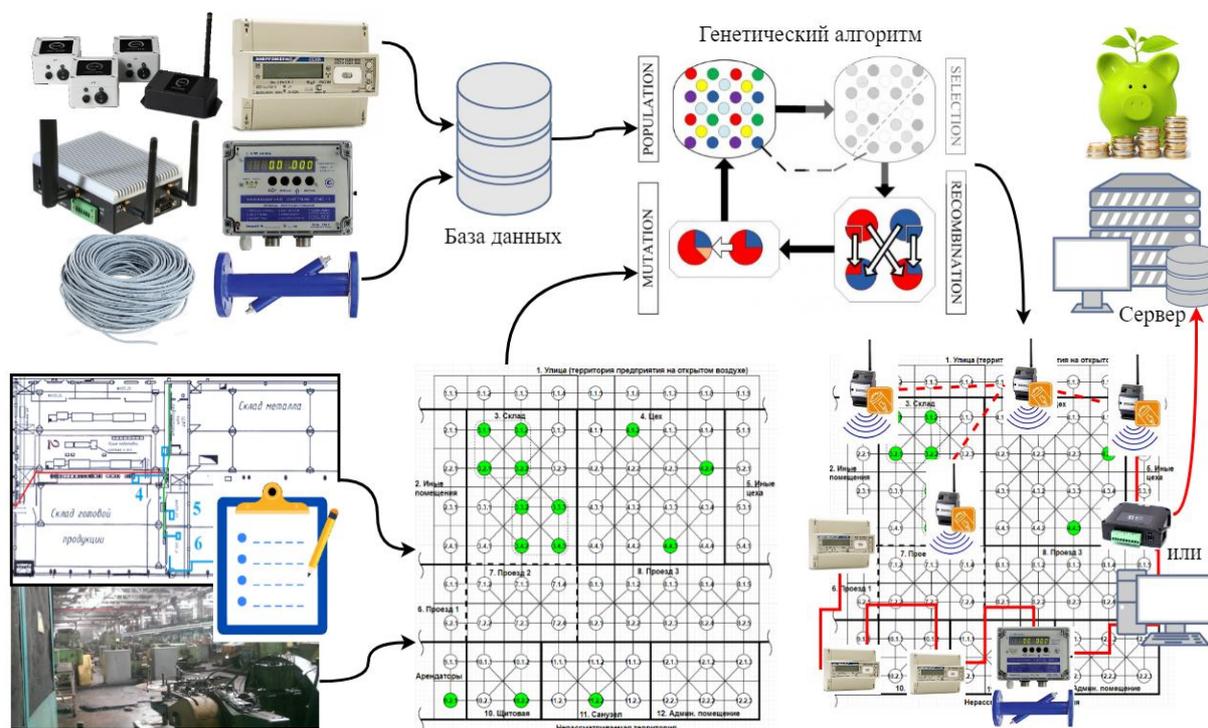
Статья поступила в редакцию 10.03.2019, в окончательном варианте –05.04.2019.

**Соколов Александр Александрович**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, ассистент, e-mail: alexander.sokolov.it@gmail.com

В работе представлено решение задачи поддержки принятия решений в процессе синтеза физической топологии сети автоматизированной системы сбора и передачи данных. Она используется в рамках системы энергетического менеджмента на машиностроительных предприятиях. Предлагается новый метод синтеза физической топологии сети сбора и передачи данных. Он обеспечивает рациональное покрытие необходимых объектов на предприятии сетью интеллектуальных средств измерения, счётчиков, датчиков, а также контроллеров системы при минимальных финансовых и временных затратах на их установку и дальнейшую эксплуатацию. Данный метод отличается от существующих следующими особенностями: наличие формализации свойств применяемого оборудования и объектов предприятия; новое представление объектов предприятия в виде взвешенного неориентированного графа; применение генетического алгоритма для получения близкой к оптимальной комбинации единиц оборудования, мест их размещения и найденных на графе кратчайших путей их объединения в сети сбора и передачи данных. Для тестирования предложенного метода разработан прототип программного решения. С его помощью проведен ряд вычислительных экспериментов. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что с помощью данного метода можно найти, по крайней мере, субоптимальные решения поставленной задачи за приемлемое время.

**Ключевые слова:** энергетический менеджмент, сбор и передача данных, синтез физической топологии сети, генетический алгоритм, сети сбора данных, граф, мониторинг потребления энергоресурсов

#### Графическая аннотация (Graphical annotation)



**SYSTEM FOR THE DECISION-MAKING SUPPORT OF THE SYNTHESIS  
OF PHYSICAL TOPOLOGY OF COLLECTION AND DATA TRANSFER NETWORK  
IN ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS**

*The article was received by editorial board on 10.03.2019, in the final version – 05.04.2019.*

**Sokolov Alexander A.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,  
assistant, e-mail: alexander.sokolov.it@gmail.com

This paper presents a solution to the problem of decision-making support in the process of synthesizing the physical topology of the network of an automated data collection and transmission system that is used as part of the energy management system at machine-building enterprises. This paper proposes a new method for synthesizing the physical topology of the network for data collection and transmission to solve this problem. It provides efficient coverage of the necessary facilities at the enterprise with a network of intelligent measuring instruments, meters, sensors, as well as system controllers with minimal financial and time costs for its implementation and further operation. This method differs from the existing ones by the formalization of the equipment used and the properties of the enterprise objects, by the new representation of the enterprise objects in the form of a weighted undirected graph, by applying a genetic algorithm to obtain the optimal combination of equipment, its locations and the shortest paths found on the graph for its integration into the data collection and transmission network. This paper presents a prototype of developed software solution to test the proposed method. With it, several computational experiments were carried out. The results obtained led to the conclusion that using this method, one can find at least suboptimal solutions of the problem in reasonable time.

**Key words:** energy management, data collection, data transmission, synthesis of the physical network topology, genetic algorithm, data collection networks, graph, energy consumption monitoring

**Принятые сокращения.** АССПД – автоматизированная система сбора и передачи данных, БД – база данных, БСС – беспроводная сенсорная сеть, ГА – генетический алгоритм, КПД – канал передачи данных, КУ – конечное устройство, ЛПР – лицо, принимающее решения, МУУ – место учета и управления, ПП – приемопередатчик, ППР – поддержка принятия решений, СЭМ – система энергетического менеджмента, УСПД – устройство сбора и передачи данных, LPWAN (англ. Low-power Wide-area Network) – энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия, LTE (англ. Long-Term Evolution) – долговременное развитие.

**Введение.** Снижение себестоимости выпускаемой продукции является одной из ключевых задач сохранения конкурентоспособности и дальнейшего развития машиностроительных предприятий. Она решается путём оптимизации процесса обеспечения производства необходимыми энергоресурсами. Для этого используются системы энергетического менеджмента (СЭМ) [14], позволяющие осуществлять следующее: 1) мониторинг потребления и выявление утечек энергоресурсов; 2) контроль выполнения энергосберегающих мероприятий; 3) управление энергопотреблением; 4) прогнозирование энергопотребления следующих производственных циклов на объектах предприятия; 5) оперативное реагирование на нештатные ситуации [9]. В данной работе к энергоресурсам отнесено следующее: электроэнергия, вода, различные газы, химические вещества и др.

На сегодняшний день технологии, используемые в СЭМ, широко распространены. Это привело к увеличению числа применяемых в них технологических решений [4]. Однако нерешенной задачей является поддержка принятия решений (ППР) при проектировании входящей в СЭМ подсистемы автоматизированного сбора и передачи данных, а также сигналов управляющих воздействий [20]. При ППР необходимо учитывать особенности поставленных задач и ограничений на возможности размещения сетей сбора и передачи данных на объектах предприятия.

Первым этапом внедрения СЭМ в промышленности является размещение на объектах интеллектуальных средств измерения, счётчиков, датчиков и контроллеров – конечных устройств (КУ). Они должны быть снабжены цифровыми интерфейсами для получения и предоставления информации [16]. Данный этап также выполняется в рамках интеллектуализации процессов получения информации, ее обработки/анализа и управления для централизованных коммунальных систем в городах в целом [2]. Вторым этапом является размещение и использование на предприятии автоматизированной системы сбора и передачи данных (АССПД). Она собирает и передаёт данные с указанных выше устройств на сервер и обратно, а её сети могут быть проводными или беспроводными. Их структура формально описывается физической топологией – конфигурацией графа, вершинам которого соответствуют КУ, серверы и коммуникационное оборудование, а ребрам – физические или информационные связи между вершинами.

На данный момент можно говорить о несовершенстве методов синтеза оптимальной физической топологии сети АССПД. Это обуславливает актуальность решения задачи ППР при выборе технологий в процессе проектирования АССПД и синтеза физической топологии её сети. При ППР необходима оценка длительности периода окупаемости проекта, минимизация стоимости и сроков реализации проекта, а также учет имеющихся ограничений на объектах предприятия.

АССПД включает в себя описанные далее уровни [12, 16], иерархическая структура которых представлена на рисунке 1: 1) нижний уровень, на котором находятся КУ; 2) средний уровень, в который входят средства обмена информацией между компонентами системы. В него входят: 2.1) каналы передачи данных (КПД) – среда распространения сигналов; 2.2) приемопередатчики (ПП) – устройства, выполняющие функции приема и отправки данных в КПД, расширения его радиуса действия, а также позволяющие перейти от одного КПД к другому; 3) верхний уровень, в который входят: 3.1) устройства сбора и передачи данных (УСПД) – программно-аппаратные решения, к которым подключается множество КУ и ПП через КПД и которые отправляют данные на локальный или удалённый сервер (или получают от него и передают далее) с помощью проводного или беспроводного подключения к локальной сети предприятия или интернету; 3.2) серверы баз данных (БД) и управления – рабочие станции, которые принимают данные от УСПД или напрямую с КУ и отправляют сигналы управляющих воздействий.

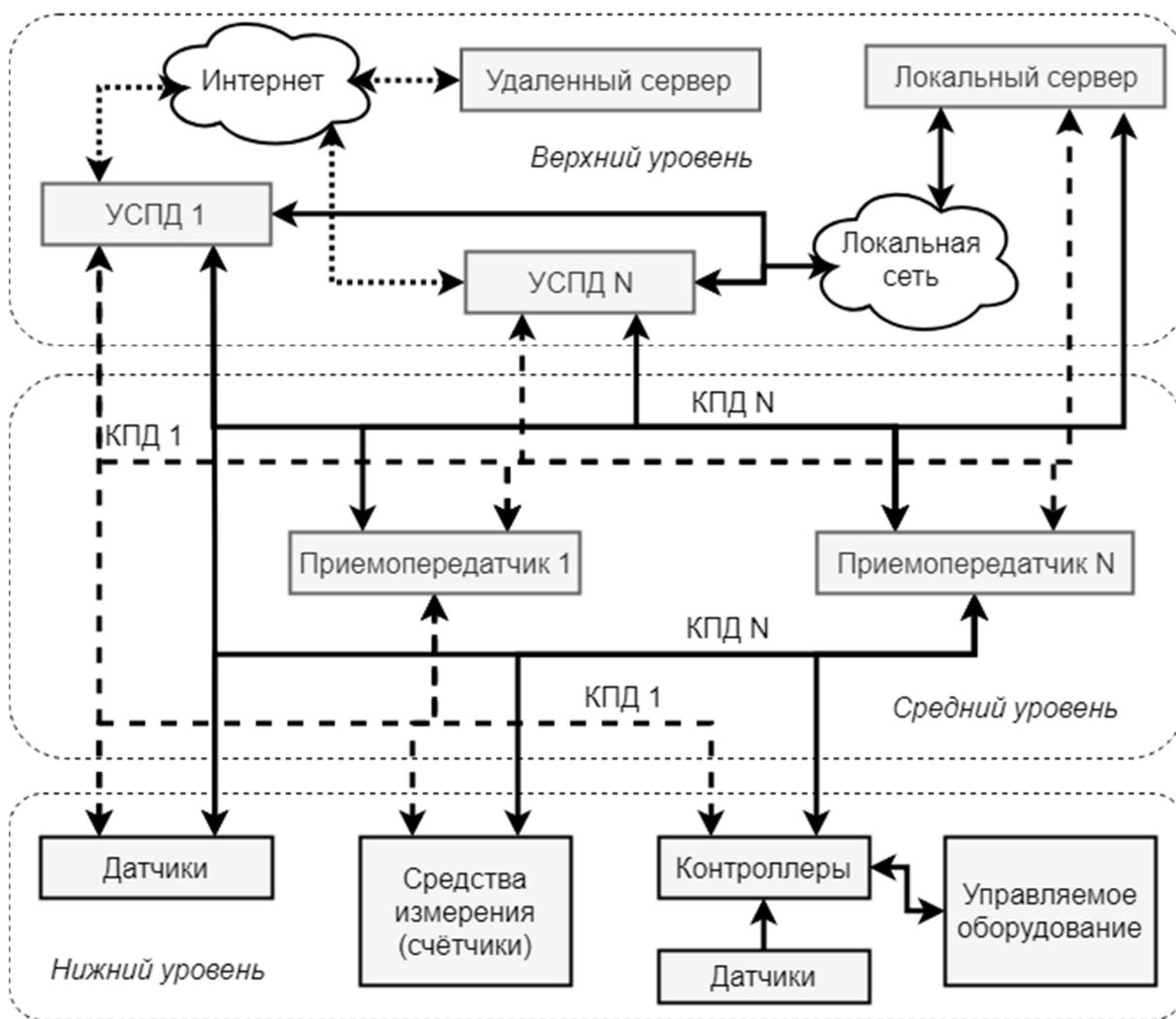


Рисунок 1 – Иерархическая структура уровней АССПД

Процесс синтеза физической топологии сети АССПД включает в себя определение оптимальной цепочки оборудования, используемого на каждом из описанных выше уровней. Он осуществляется путем выполнения следующих шагов, показанных на рисунке 2 и более подробно описанных далее.

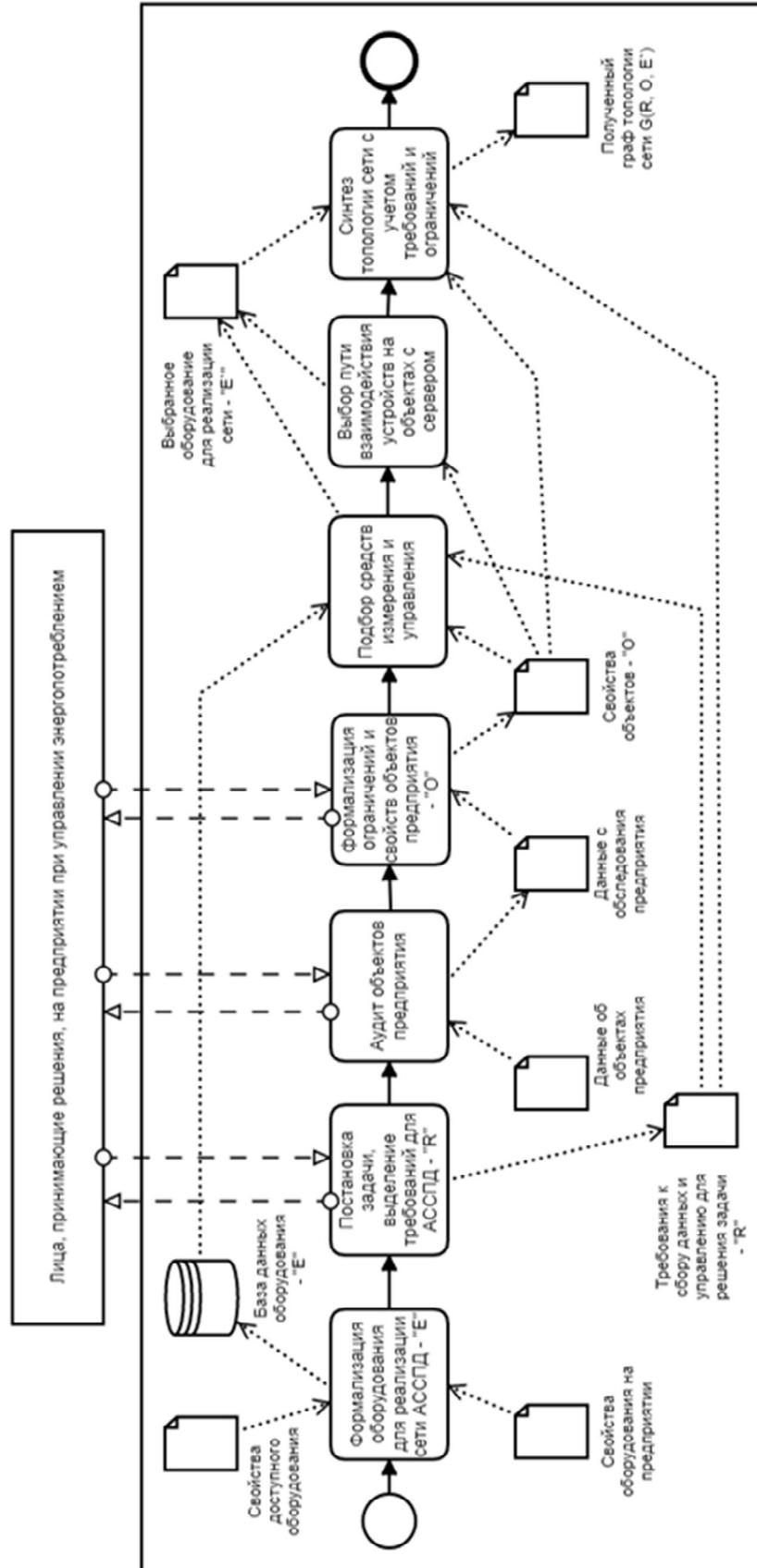


Рисунок 2 – Процесс синтеза физической топологии сети АССПД

1. Вначале производится формализация характеристик доступного для установки оборудования «Е» (см. рис. 2) и способов его комбинирования. Они дополняются характеристиками уже установленно-го оборудования на предприятии.

2. Производится постановка целевой задачи в проектируемой системе «R». Это осуществляется в диалоге с лицами, принимающими решения (ЛПР) в сфере управления обеспечением энергоресурсами и оптимизации энергопотребления предприятия. Формируются множества измеряемых энергоресурсов, параметров производства, управляемого оборудования, мест учета (энергоресурсов) и управления (оборудованием) (МУУ), располагающихся на предприятии. Также задаётся их приоритет в очередности покрытия сетью.

3. Далее производится аудит объектов предприятия и изучение особенностей процесса сбора и передачи данных на них. Выявляются ограничения и свойства объектов путём анализа схем территорий, планов помещений объектов предприятия [12].

4. По результатам аудита осуществляется формализация территории предприятия в виде графа. Также формализуются ограничения и свойства объектов «O», которые накладываются на процесс синтеза сети АССПД.

5. Выбирается оборудование для КУ – «E'».

6. Производится выбор способа взаимодействия КУ с УСПД или сервером – дополняется «E'».

7. Выполняется синтез топологии сети АССПД в виде ряда подграфов  $G_i(R, O, E')$  графа территории предприятия, которые покрывают каждое  $i$ -е МУУ (при их количестве «M»). При их формировании учитываются свойства и ограничения объектов, а также учитывается одно из выбранных ЛПР требований синтеза топологии АССПД:

а) стоимость установки оборудования не превышает размер заданного ЛПР бюджета  $b$  на проект:

$$\sum_{i=1}^M F_c(G_i(R, O, E')) \leq b; \quad (1)$$

б) время установки оборудования не превышает заданного ЛПР времени на реализацию проекта  $t$ :

$$\sum_{i=1}^M F_t(G_i(R, O, E')) \leq t; \quad (2)$$

в) минимизация финансовых затрат на установку оборудования:

$$\sum_{i=1}^M F_c(G_i(R, O, E')) \rightarrow \min \quad (3)$$

г) минимизация временных затрат на установку оборудования:

$$\sum_{i=1}^M F_t(G_i(R, O, E')) \rightarrow \min \quad (4)$$

д) минимизация суммарных финансовых затрат при наличии значения стоимости выполнения часа работ  $p_{\text{час}}$ :

$$\sum_{i=1}^M (F_c(G_i(R, O, E')) + F_t(G_i(R, O, E'))p_{\text{час}}) \rightarrow \min \quad (5)$$

Таким образом, актуальной задачей является осуществление ППР за счёт автоматизации описанных выше шагов. Для решения поставленной задачи в данной работе предлагается новый метод синтеза физической топологии сети АССПД для СЭМ. Он обеспечивает покрытие всех выбранных МУУ сетью сбора и передачи данных с учетом описанных выше требований. Данный метод отличается от существующих следующим: 1) наличие формализации применяемого оборудования, из которого формируется БД устройств для дальнейшего получения их комбинаций; 2) наличие формализации свойств объектов предприятия с применением множества экспертных оценок, получаемых от ЛПР; 3) новое представление совокупности рассматриваемых объектов предприятия в виде взвешенного неориентированного графа; 4) применение генетического алгоритма (ГА) для получения близкой к оптимальной (субоптимальной) комбинации единиц оборудования, мест их размещения и найденных на графе кратчайших путей их объединения в сети сбора и передачи данных.

**Степень разработанности темы исследования.** Многочисленные исследования на сегодняшний день проведены в направлении повышения эффективности размещения беспроводных сенсорных сетей (БСС) [1, 3, 5, 6, 10]. Однако не во всех работах оценивается экономический эффект от их внедрения, особенно в сравнении с проводным способом или в их комбинации, а также затрачиваемое на установку оборудования время. Лишь небольшое число проведённых исследований было направлено на реализацию АССПД с применением комплекса различных типов технологий сбора и передачи данных с учетом ограничений на объектах предприятия. В [21] представлена архитектура беспроводной сети датчиков и приводов для измерения потребления электроэнергии и управления устройствами в разнообразной среде большого здания. Аналогичная технология передачи данных представлена в разработанной в [8] СЭМ предприятия. Она имеет значительное количество точек сбора данных, распределенных по производственным, техноло-

гическим и прочим участкам. Преимущества описанных выше решений заключаются в гибкости формирования сети и легкости добавления новых узлов. Их недостатком является требование к покрытию здания локальной сетью и устройствами для беспроводного или проводного подключения к ней. Это не всегда практически реализуемо на промышленных предприятиях вследствие больших размеров цехов и отсутствия необходимой инфраструктуры локальных сетей предприятия в целом.

В различных источниках ранее уже рассматривалась задача синтеза физической топологии БСС с применением графов [15]. Системы синтеза сетей на базе беспроводных датчиков рассмотрены в [9]. В ней предложена информационная модель синтеза структуры АССПД. Однако в рамках этих работ применялись только беспроводные способы передачи данных и не учитывалась задача передачи данных на удаленный сервер.

Комбинации проводных и беспроводных сетей предлагались в [23]. Представленные гибридные системы позволяют оптимизировать стоимость их реализации. Но необходимо также рассмотреть ограничения среды на объектах предприятия и большее количество способов передачи данных, особенно популярных в Российской Федерации.

Для поиска комбинаций используемого оборудования и выбора близких к оптимальным (субоптимальных) путей соединения его в сети АССПД из множества потенциально возможных решений эффективно применяется ГА, например, в [27]. В [7] подробно описано применение эволюционных вычислений при решении похожих задач на графах. Так, для БСС задача оптимального покрытия указанной территории может быть решена с помощью использования ГА, а также алгоритмов муравьиных колоний, как показано в [25]. Данные работы демонстрируют, что применение ГА для подобных задач позволяет успешно достигать поставленных целей. Несмотря на это, представленные решения достаточно далеки от рассматриваемых в текущей работе аппаратно-технических решений.

В [11] предложен алгоритм построения структуры БСС, основанный на применении муравьиных, пчелиных и генетических алгоритмов. Продемонстрированы результаты синтеза топологии БСС на объекте с пространственными ограничениями. Однако с помощью данного алгоритма не решается задача подбора оптимального оборудования и не рассмотрено размещение множества приемопередатчиков. Отметим, что этот метод может быть использован в комбинации с предлагаемым в текущей работе методом для решения задачи построения сети датчиков на конкретном объекте. Настоящая статья посвящена решению более глобальной задачи – на множестве разнородных объектов с применением оборудования различных типов и различных способов передачи данных.

**Предлагаемый метод.** Метод включает в себя последовательность следующих шагов, показанных на рисунке 3.

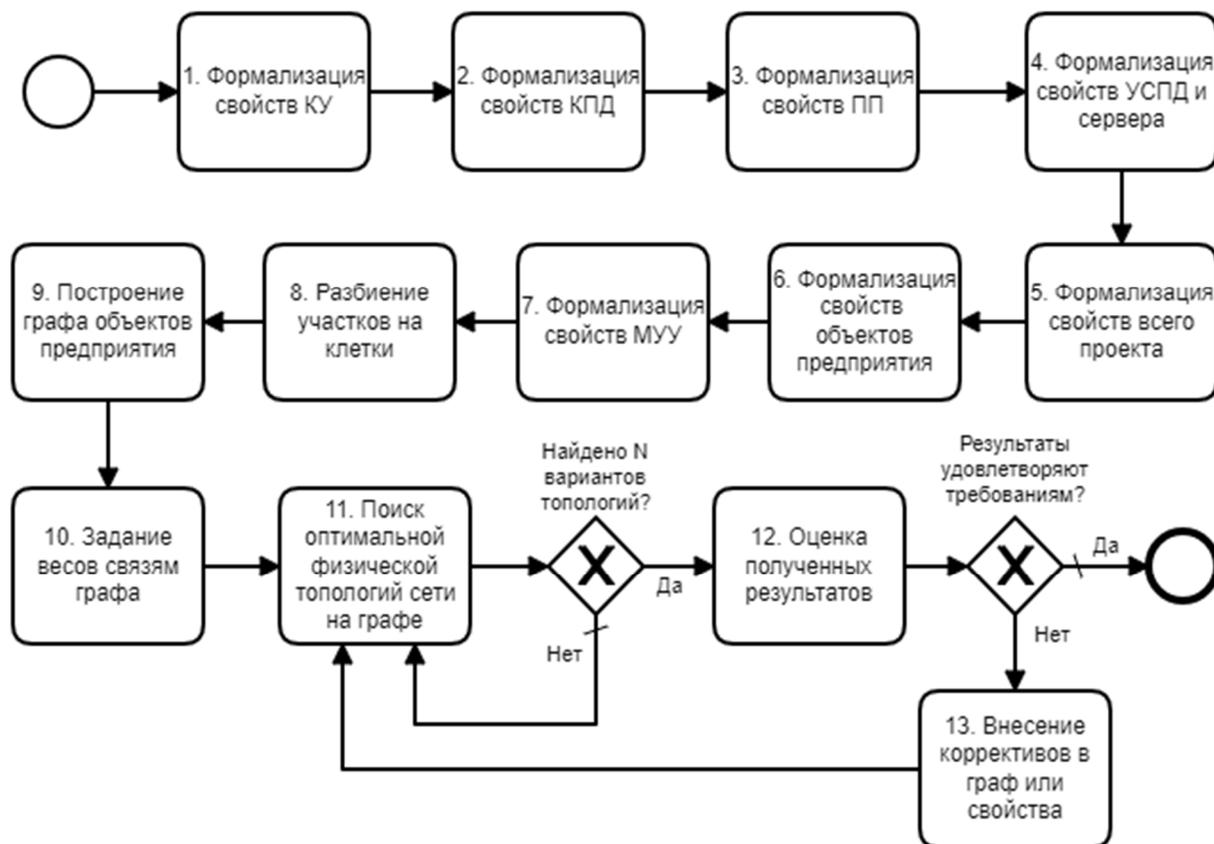


Рисунок 3 – Последовательность шагов предлагаемого метода

Шаг 1 заключается в формализации свойств КУ. Основными из них являются:  $S_{КУ}$  – множество способов передачи данных, по которым данное КУ может отправлять данные в КПД, например, RS-485, BlueTooth, ZigBee, электрические импульсы и др.;  $M_{КУ}$  – множество всех измерений потребления энерго-ресурсов данным КУ;  $C_{КУ}$  – множество всех управляющих воздействий, которые можно оказывать на оборудование с помощью данного КУ.

Шаг 2 заключается в формализации свойств КПД. К основным из них отнесены:  $u_{КПД}$  – логическое значение, обозначающее, является ли КПД беспроводным или нет;  $s_{КПД}$  – способ передачи данных, используемый в данном КПД;  $r_{КПД}$  – дробное значение максимальной дальности передачи данных по КПД;  $n_{КПД}$  – топология связи устройств, допустимая для использования с данным КПД: ячеистая, шина или звезда.

Шаг 3 заключается в формализации свойств ПП, к основным из которых отнесены:  $S_{ПП}^R$  – множество доступных способов приёма данных от КУ или КПД;  $S_{ПП}^S$  – множество способов отправки данных в другой КПД.

Шаг 4 заключается в формализации свойств сервера и УСПД. Основными из них являются:  $S_{УСПД}^R$  – множество доступных способов приёма данных от КПД;  $I_{УСПД}$  – множество способов передачи данных на сервер. В работе рассмотрено соединение с помощью проводного и беспроводного подключения к локальной сети предприятия или интернету, а также средствами GSM, GPRS, 3G, 4G или LPWAN. Возможны два варианта соединения КУ с локальным или удалённым сервером (см. рис. 1): 1) к серверу напрямую подключается КПД, и он является одним из УСПД; 2) данные поступают на сервер с помощью совокупности УСПД, принимающих данные из КПД и передающих их на сервер. Причём КУ может объединяться с УСПД, если оно имеет функционал для передачи данных в локальную сеть предприятия или интернет через GSM/GPRS и т.п.

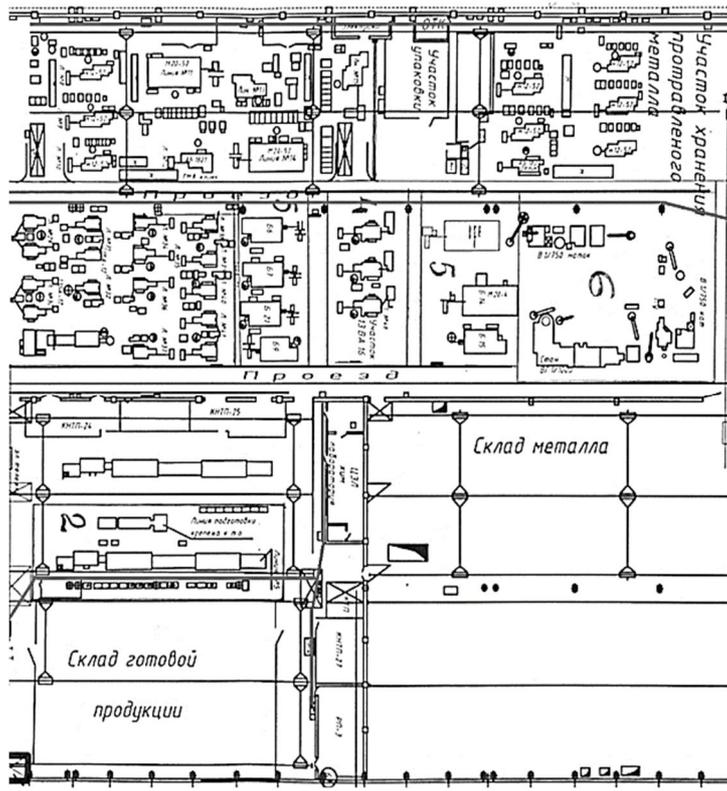
Также у КУ, КПД (если он является проводным), ПП и УСПД имеется ряд одинаковых свойств. В основные из них входят следующие:  $p_{КУ}^p, p_{КПД}^p, p_{ПП}^p, p_{УСПД}^p$  – дробные значения стоимости приобретения;  $p_{КУ}^l(v), p_{КПД}^l(v), p_{ПП}^l(v), p_{УСПД}^l(v)$  – дробные значения стоимости монтажа в вершине графа  $v$ ;  $t_{КУ}^l(v), t_{КПД}^l(v), t_{ПП}^l(v), t_{УСПД}^l(v)$  – дробные значения количества часов, затрачиваемых на установку в вершине графа  $v$ .

Шаг 5 заключается в описании свойств всего проекта по внедрению АССПД. Основные свойства проекта следующие:  $b$  – дробное значение бюджета проекта, который не должен быть превышен;  $t$  – дробное значение количества месяцев периода эксплуатации АССПД для расчета затрат на её использование во времени;  $l$  – логическое значение, обозначающее, требуется ли использовать локальный сервер, иначе будет использоваться удалённый сервер;  $i$  – логическое значение, обозначающее будет ли доступен выход в интернет из локальной сети предприятия;  $a_b, a_r$  – дробные значения абонентской платы в месяц за использование локального сервера и предоставляемого удалённого сервера;  $I$  – множество способов передачи данных на сервер (GSM/GPRS, 3G, 4G/LTE, LPWAN и др.), доступных на территории предприятия;  $I_p$  – множество стоимостей абонентского обслуживания одного УСПД.

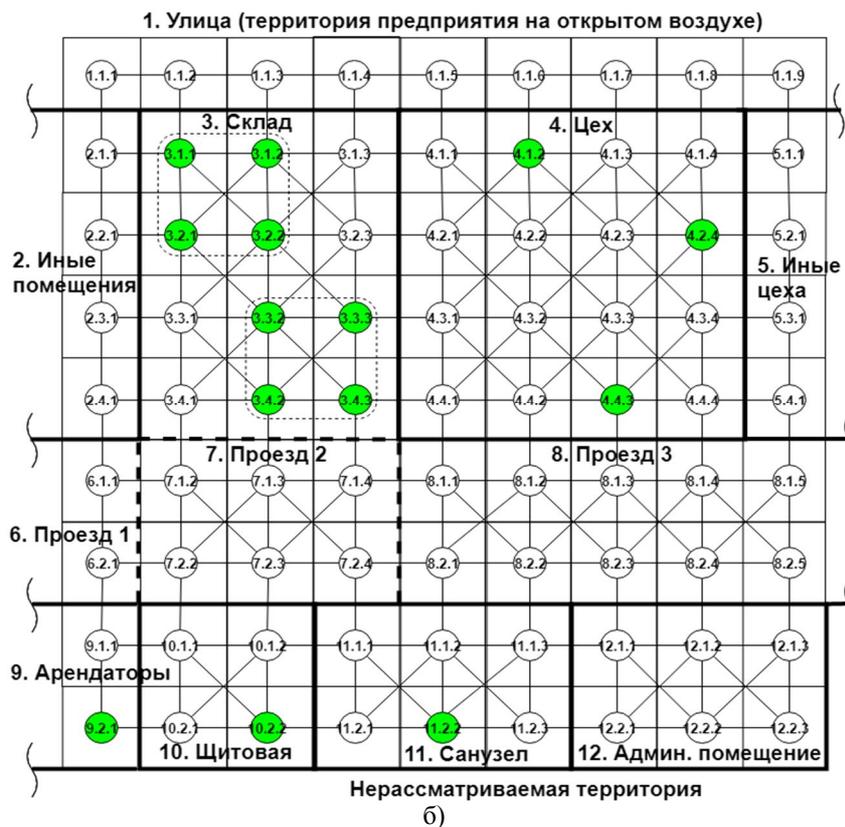
Шаг 6 заключается в формализации свойств каждого из рассматриваемых на предприятии объектов. Для этого используются следующие материалы (источники): 1) планы помещений; 2) схемы зданий и цехов (пример схемы показан на рисунке 4а); 3) карты территорий предприятия, прилегающих к объектам; 4) вновь разработанные схемы с соблюдением масштабов, размеров и точности планировок (данная задача ложится на разработчика схемы).

Если объекты предприятия удалены друг от друга на значительные расстояния (более 300 м.), то в диалоге с ЛПР рассматривается вопрос о разбиении проекта. Он делится на множество отдельных проектов по внедрению АССПД для каждого из удалённых объектов предприятия (территориальных частей проекта).

Формируется единая схема указанных объектов предприятия и только прилегающих к ним территорий предприятия. С неё убираются все посторонние обозначения и надписи, и она разбивается на множество участков. Участок ограничивается путем выделения прямоугольной области произвольного размера с однородной средой и общим назначением (например, одно помещение или производственная зона). Участки плотно примыкают друг к другу, без зазоров и учета толщины стен между ними, также они могут быть вложенными друг в друга.



a)



б)

Рисунок 4 – Примеры частей схем предприятия: а) часть исходной схемы; б) часть обработанной схемы с выделенными участками, разбитой на клетки, в которые помещены вершины графа (см. шаги 8 и 9, зелёным цветом выделены МУУ)

Основными свойствами участка являются следующие:

- $h_y, w_y$  – целые числа длины и ширины участка (округляются до 1 метра);
- $i_y^e, i_y^w$  – логические значения, обозначающие наличие на данном участке проводного и беспроводного подключения к локальной сети предприятия;
- $f_{агрессивн.}$  – пять целых значений экспертных оценок агрессивности среды на каждой из границ участка и внутри участка в диапазоне от 1 до 10. Здесь 10 – высокая агрессивность, проведение монтажных работ на данном участке невозможно, 5 – на открытом воздухе или аналогичная по агрессивности среда, где требуются средства защиты от температур, влаги, прямых солнечных лучей и т.п., 1 – офисное помещение;
- $f_{непригодн.}$  – пять целых значений экспертных оценок непригодности каждой из границ участка для размещения на ней КУ, КПД и т.д. и во внутренней части участка. Они обозначают, доступны ли участки в дальнейшем для диагностики, имеется ли доступ к ним только для персонала и т.п. Оценки в диапазоне от 1 до 10, где 10 – непригодно, 5 – пригодно с дополнительными затратами, 1 – пригодно;
- $f_{труд.}$  – пять целых значений экспертных оценок от 1 до 10 трудоемкости проведения монтажных работ вдоль каждой из границ участка и внутри участка. Они определяются при аудите объектов предприятия, где 1 – низкая трудоёмкость проведения монтажных работ, 5 – требуются спецсредства для проведения работ, 10 – монтаж невозможен;
- $f_{радио. непроход.}$  – пять целых значений экспертных оценок непроходимости радиоволн через границы между участками и внутри участка. Они также определяются при аудите объектов предприятия и находятся в диапазоне от 1 до 10, где 1 – низкая (преграда для радиоволн незначительна), 5 – имеются затруднения, небольшие шумы или преграды (типовая кирпичная стена толщиной 30 см современного здания), 10 – высокая, сигнал не проходит через стены участка или внутри участка;
- $f_{провод. непроход.}$  – пять целых значений экспертных оценок трудоемкости проведения проводных связей (кабелей) через границы между участками и внутри участка, где 1 – низкая, 5 – имеются затруднения, 10 – высокая.

Шаг 7 заключается в формализации свойств МУУ. Основными из них являются их координаты и размеры (которые будут использованы на шаге 9), а также следующие:  $g$  – целое значение экспертной оценки приоритета покрытия данной МУУ сетью АССПД, начиная с 0, где 0 – самый высокий приоритет;  $M_{МУУ}$  – множество всех доступных измерений потребления энергоресурсов;  $S_{МУУ}$  – множество всех управляющих воздействий. На участке может располагаться одно и более МУУ. На каждом МУУ может размещаться одно и более КУ.

Шаг 8 заключается в разбиении каждого участка схемы на квадратные клетки с длиной стороны клетки, соответствующей «1» или более метров (задается в общих свойствах проекта), как показано на рисунке 4б. Разбиение участков на клетки начинается из одного из углов участка и заканчивается в противоположном. Если не удастся разделить участок на целое количество клеток, то на участке могут остаться неполные клетки (меньшие по размеру прямоугольнику). Если одна из длин сторон такой клетки меньше половины заданной длины, то она объединяется с одной из соседних, иначе она остается на схеме в качестве отдельной клетки. Для упрощения работы метода рекомендуется избегать участков со сложной формой и упрощать их на схеме с целью устранения неполных клеток. Также рекомендуется округлять размеры участков до 1 метра – для этого может потребоваться модификация всей схемы.

Шаг 9 заключается в построения графа  $G(V, E)$ , где  $V$  – это множество вершин, которые располагаются в центрах, добавленных на предыдущем шаге клеток, а  $E$  – множество ребер графа, которые строятся между всеми соседними вершинами графа (см. рис. 4б, но на нём соединены не все соседние вершины, см. раздел Результаты). Отдельно выделяются те вершины, в которых располагаются МУУ. Одно МУУ может занимать одну вершину или несколько (область).

На 10 шаге необходимо каждой вершине графа задать вес  $F_{труд.}$  трудоемкости проведения работ в данной вершине. Каждому ребру графа необходимо задать 3 веса  $F_{беспров.}, F_{провод.}, F_{дистан.}$ . Они характеризуют трудоемкость проведения беспроводного КПД, проводного КПД и дистанцию между ребрами графа. Веса рассчитываются с помощью метода взвешенной суммы критериев – описанных выше свойств участков по формуле аддитивной свертки. Также для указанных выше « $N$ » критериев используются весовые коэффициенты  $w_i$ , определяющие относительные степени важности отдельных критериев и удовлетворяющие соотношениям:

$$0 \leq w_i \leq 1; \quad i = 1, \dots, N; \quad \sum_{i=1}^N w_i = 1. \quad (6)$$

Весовые коэффициенты критериев назначаются в диалоге с ЛПП. Они в дальнейшем при необходимости могут корректироваться в соответствии с изменением значимости тех или иных оценок на определенном предприятии. Агрегированные веса рассчитываются по следующим формулам.

1. Вес для трудоемкости проведения работ в вершине:

$$F_{\text{труд}} = w_{\text{труд}} \cdot f_{\text{труд}} + w_{\text{агрессивн.}} \cdot f_{\text{агрессивн.}} + w_{\text{непригод.}} \cdot f_{\text{непригод.}} \quad (7)$$

2. Вес для беспроводной связи внутри участка и на границе участка равен экспертной оценке  $f_{\text{радио.непроход.}}$  внутри и на границе участка соответственно:

$$F_{\text{беспров.}} = f_{\text{радио.непроход.}} \quad (8)$$

3. Вес для беспроводной связи через границу между двумя участками равно среднему значению экспертных оценок непроходимости радиоволн через границу из первого участка во второй и из второго участка в первый:

$$F_{\text{беспров.}} = (f_{\text{радио.непроход.1}} + f_{\text{радио.непроход.2}}) / 2 \quad (9)$$

4. Вес для проводной связи внутри участка и на границе участка:

$$F_{\text{пров.}} = w_{\text{труд}} \cdot f_{\text{труд}} + w_{\text{агрессивн.}} \cdot f_{\text{агрессивн.}} + w_{\text{непригод.}} \cdot f_{\text{непригод.}} \quad (10)$$

5. Вес для проводной связи через границу между двумя участками равен среднему значению сумм экспертных оценок трудоемкости проведения проводных связей через границу из первого участка во второй и из второго участка в первый и весов проводной связи через границу:

$$F_{\text{пров.}} = \frac{(w_{\text{пров.непрох.}} \cdot f_{\text{пров.непрох.1}} + w_{\text{пров.}} \cdot F_{\text{пров.1}}) + (w_{\text{пров.непрох.}} \cdot f_{\text{пров.непрох.2}} + w_{\text{пров.}} \cdot F_{\text{пров.2}})}{2} \quad (11)$$

$F_{\text{дистан.}}$  рассчитывается с учетом того, что ребра графа характеризуют длину, равную заданной на предыдущем шаге длине стороны клеток.

На шаге 11 необходимо найти один или более подграфов исходного графа (секций), покрывающих все КУ на МУУ. Они связывают их напрямую или через ПП с УСПД (в каждом подграфе участвует один УСПД). Все связи между устройствами являются кратчайшими путями на графе. Оборудование выбирается такое, чтобы минимизировать один из следующих параметров в зависимости от приоритетного для ЛПП требования: финансовые затраты на его приобретение и монтаж; временные затраты на монтаж; финансовые затраты на обслуживание системы; суммарные затраты при наличии значения стоимости выполнения часа работ. Для поиска данных комбинаций используется ГА, который состоит из описанной далее последовательности шагов [7, 22], показанной на рисунке 5.

Шаг 11.1 (для алгоритма по рис. 5) заключается в следующем: (1) инициализация параметров алгоритма, таких как размер популяции, типы мутации и скрещивания, коэффициенты их вероятностей, тип селекции, критерий остановки алгоритма и др., (2) задание фитнес-функции (функции приспособленности особей популяции) и (3) формирование начальной популяции – генерация набора исходных, случайных решений [7, 22]. Гены хромосомы представляют собой следующий массив целых чисел, разделённых на «М» секций для каждой МУУ:

$$\{ \{ \langle D, V_D, C_0 \rangle, \langle T_1, V_{T1}, C_1 \rangle, \langle T_2, V_{T2}, C_2 \rangle, \langle A, V_A \rangle \}_1, \dots, \{ \langle D, V_D, C_0 \rangle, \langle T_1, V_{T1}, C_1 \rangle, \langle T_2, V_{T2}, C_2 \rangle, \langle A, V_A \rangle \}_M \},$$

где  $D$  – представление выбранного КУ, частично или полностью покрывающего МУУ;  $V_D$  – представление вершины графа, в которой располагается КУ;  $C_i$  – представление  $i$ -го КПД ( $i = 0, 1, 2$ ), который используется для отправки данных из КУ или из  $i$ -го ПП;  $T_i$  – представление  $i$ -го ПП ( $i = 1, 2$ ), может быть равно 0, в случае, когда одного или обоих ПП может не быть в хромосоме, т.е. связь КУ с УСПД удалось реализовать только с одним ПП или вообще без них);  $V_{T_i}$  – представление вершины графа, в которой располагается  $i$ -й ПП, аналогично может быть равно 0;  $A$  – представление УСПД;  $V_A$  – представление вершины графа, в которой располагается УСПД.

В качестве описанных представлений сущностей выступают либо уникальные идентификаторы оборудования или вершин графа, либо индексы их позиций в упорядоченных массивах. Каждая секция формируется для одного и более КУ, связанного с УСПД, на каждом МУУ.

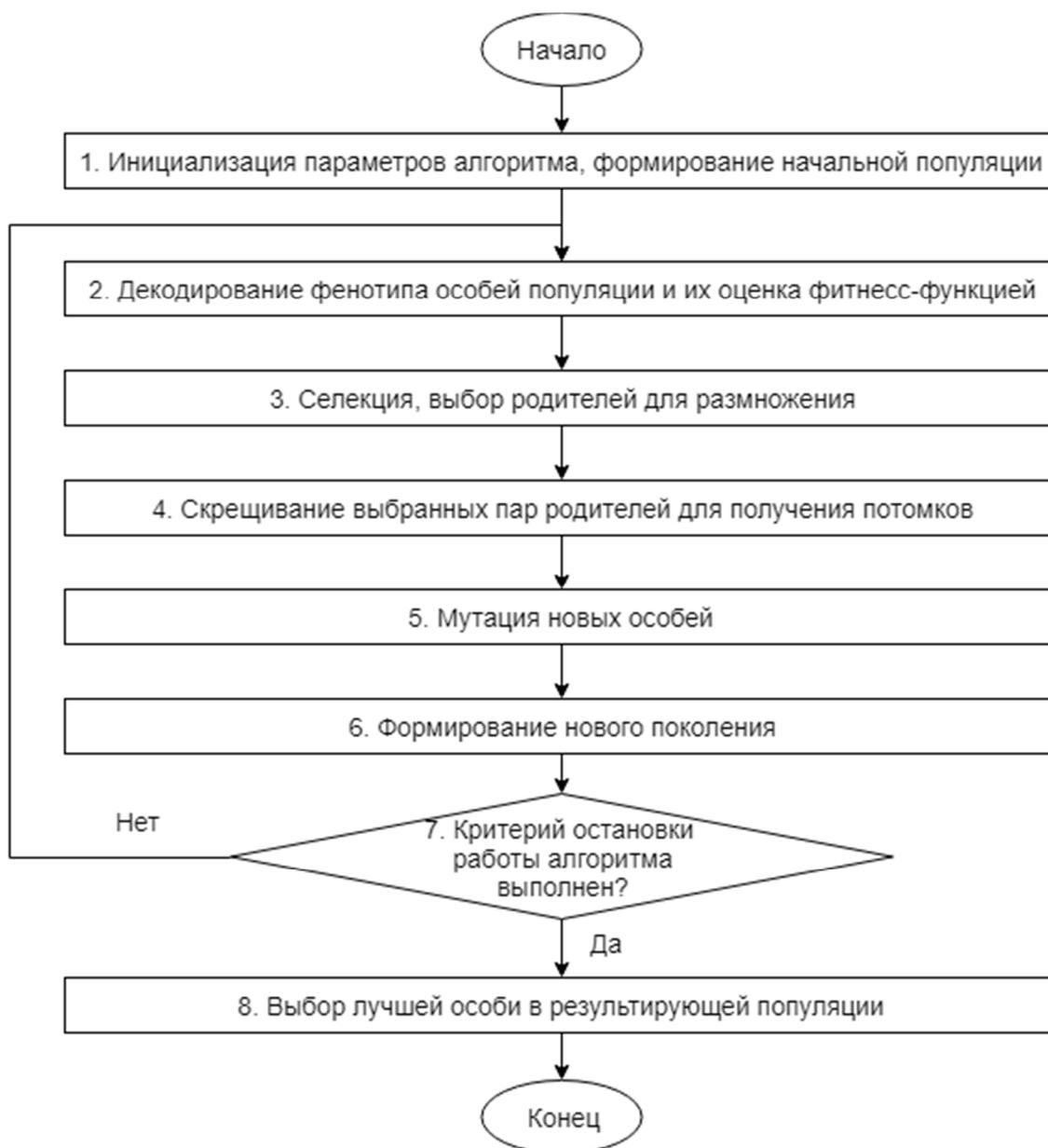


Рисунок 5 – Блок-схема используемого в данной работе генетического алгоритма

Для сужения пространства поиска выбор генов при формировании хромосом особей осуществляется не полностью случайным, а эвристическим способом. Он заключается в соблюдении следующих правил выбора случайных сущностей:

- $D$  из множества КУ подходят для покрытия МУУ, исходя из его  $M_{КУ}$  и  $C_{КУ}$ ;
- $V_D$  располагаются в границах МУУ на участках;
- способы передачи данных  $C_i$  входят во множества  $S_{КУ}, S_{ПШ}, S^S_{ПШ}, S^R_{УСПД}$ ;
- способы приема данных от КУ в  $T_i$  и  $A$  ( $S^R_{ПШ}, S^R_{УСПД}$ ) входят во множества  $S_{КУ}$ ;
- $V_T$  и  $V_A$  выбираются на случайных участках, но из имеющихся вершин на участках выбираются случайные из лучших.

Дальнейшие шаги алгоритма выполняются в цикле, моделируя «эволюционный процесс». Он продолжается несколько поколений, пока не будет выполнен критерий остановки алгоритма.

Шаг 11.2 (по рис. 5) заключается в вычислении приспособленности особей текущего поколения с помощью функции оценки пригодности – фитнес-функции. Её алгоритм показан на рисунке 6.

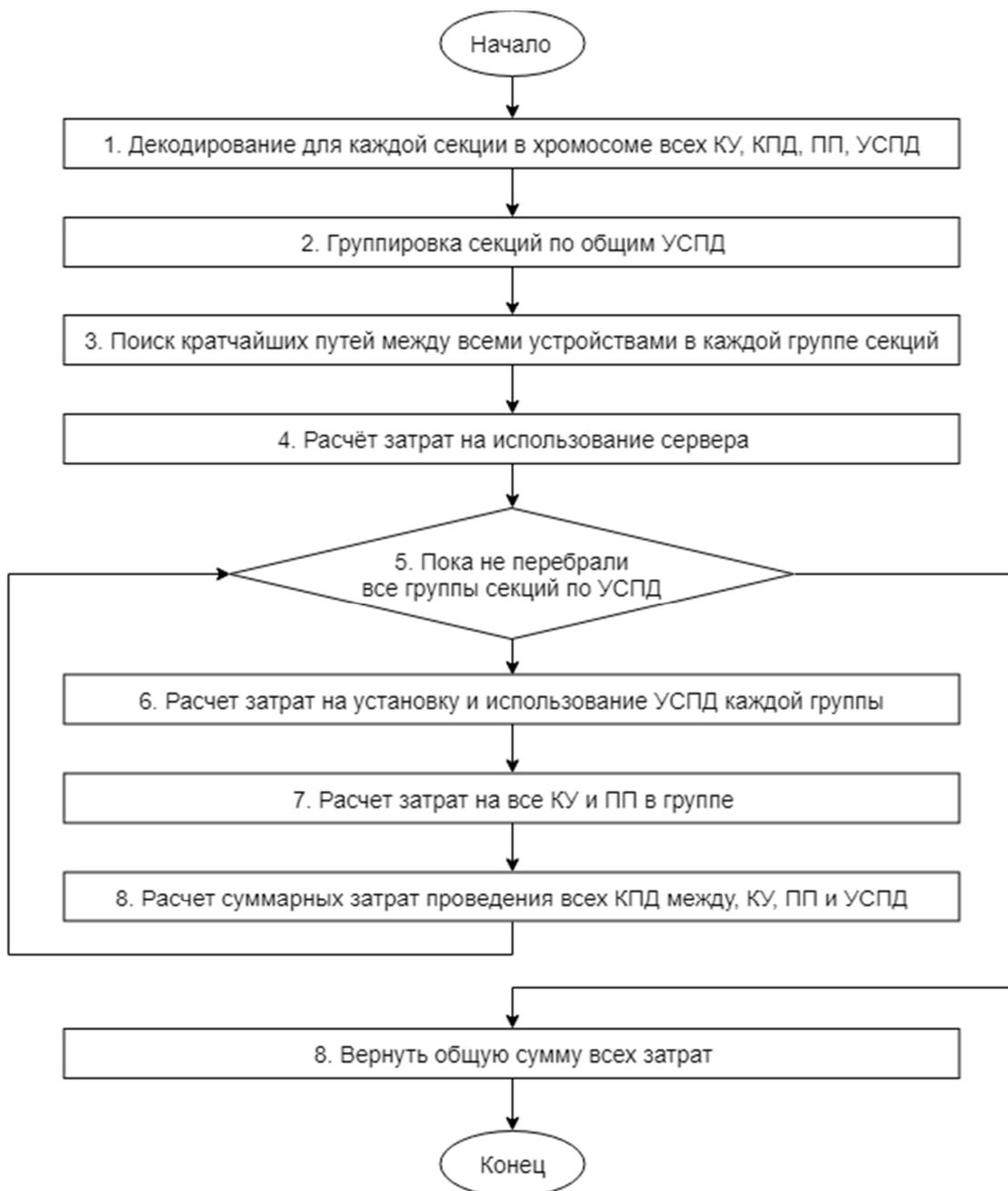


Рисунок 6 – Алгоритм используемой фитнес-функции

В данной работе значение фитнес-функции соответствует суммарной стоимости приобретения и монтажа оборудования, установки и проведения КПД между оборудованием и зависит от параметров проекта. Чем вычисленное значение меньше, тем более приспособлена особь. В алгоритм функции входит этап декодирования – это процесс преобразования хромосомы с решением из генотипа в фенотип. В данной работе генотип – это вышеуказанный массив целых чисел, а фенотип – соответствующие элементам массива сущности БД КУ, КПД, ПП, УСПД, характеристики которых комплексно учитываются фитнес-функцией. Отличительной особенностью предложенной в данной работе эволюционной модели является сужение пространства поиска за счёт процедуры группировки нескольких УСПД. Если на одном участке были размещены одинаковые УСПД, то они объединяются в одно, расположенное в случайной из лучших вершин графа на участке (шаг 2 на рис. 6).

Далее с помощью алгоритма поиска кратчайшего пути на графе находятся связи между всеми устройствами в сгруппированных секциях по выбранным КПД. Кратчайшим является путь с наименьшим суммарным весом. Он рассчитывается путём суммирования весов ребер графа с учётом следующих свойств: 1)  $n_{КПД}$  – выбирается вес проводной или беспроводной связи ребер ( $F_{беспров.}$  или  $F_{провод.}$ ); 2)  $n_{КПД}$  –

топология КПД, выбираемая алгоритмом поиска при соединении множества вершин; 3) суммарное расстояние всех  $F_{дистан}$  между выбранными вершинами. Если дальность суммарного пути превышает допустимую  $r_{КПД}$ , то данный путь неприемлем – значение фитнес-функции для данной хромосомы задается равным максимально допустимому значению.

В итоге вычисляется стоимость сформированного решения в хромосоме путём суммирования следующих значений: 1) стоимость использования выбранного сервера; 2) затраты на использование УСПД в каждой группе; 3) затраты на использование ПП и на установку или замену КУ; 4) стоимость монтажа проводных КПД между устройствами (стоимость монтажа беспроводных КПД равна нулю). Все стоимости установки оборудования и проведения связей рассчитываются с учётом весов вершин ( $F_{мпрод.}$ ) и ребер графа ( $F_{беспров.}$ ,  $F_{пров.}$ ). Таким образом учитываются дополнительные затраты на проведение работ в условиях агрессивности среды на участках.

Шаг 11.3 (по рис. 5) заключается в выборе хромосом-родителей для формирования нового поколения. В данной работе предлагается включать в новое поколение лучшие родительские особи (с наименьшим значением фитнес-функции).

Шаг 11.4 (по схеме на рис. 5) заключается в применении оператора скрещивания. В данной работе решено использовать однородное скрещивание (универсальный кроссинговер). В нём значение каждого гена в хромосоме потомка определяется случайным образом из соответствующих генов родителей [7].

На шаге 11.5 применяется оператор мутации с вероятностью  $0 < X < 1$ . В данной работе была выбрана однородная мутация. В ней, аналогично оператору скрещивания, каждый ген с вероятностью «X» может быть заменён новым значением, полученным описанным выше эвристическим способом [24].

Шаг 11.6 заключается в формировании нового поколения из лучших потомков и родителей.

На шаге 11.7 осуществляется проверка останковки алгоритма. В данной работе использован критерий останковки по достижению заданного количества сформированных поколений.

В конце алгоритма (рис. 5) на шаге 11.8 будет возвращена хромосома с наименьшим значением фитнес-функции.

В данной работе предлагается выполнять алгоритм по рисунку 5 многократно и выбирать лучшее решение из ряда сформированных вариантов. После этого производится оценка полученного решения и проверка удовлетворения решения требованиям, поставленным ЛПР.

Если полученные решения частично или полностью неприменимы на рассматриваемом предприятии, то должны быть внесены коррективы в граф предприятия, в свойства оборудования, участков предприятия или всего проекта в соответствии с выявленными недостатками решений. После этого поиск необходимо производить повторно.

Одним из преимуществ предлагаемого метода, выявленных путём его тестирования с использованием свойств множества различных предприятий и учреждений г. Волгограда, является расчет близкого к оптимальному количества используемых УСПД. Его увеличение повышает стоимость обслуживания системы, а уменьшение – усложняет описанную выше цепочку применяемого оборудования (КУ, КПД, ПП, УСПД). Соответственно, усложняется физическая топология сети. Эффективность решения оценивается путём подсчёта количества используемых в решении КУ, КПД, ПП, УСПД и расчёта их суммарной стоимости при достижении выбранного ЛПР требования.

Описанная выше оптимизация количества используемых УСПД, устраняющая избыточные УСПД, способствует уменьшению количества точек доступа в сеть извне. Это ведёт к снижению вероятности несанкционированного проникновения в локальную сеть предприятия через УСПД и саму сеть сбора и передачи данных. Предполагается, что сервер и УСПД уже имеют необходимое аппаратное и программное обеспечение для подключения к локальной сети предприятия или интернету, защищающее их от несанкционированного проникновения и получения доступа к оборудованию и данным. Другие вопросы безопасности, а также такие параметры сети АССПД, как отказоустойчивость, быстродействие и объемы передачи данных в данной работе на текущий момент не рассматриваются. Однако предполагается, что они будут рассмотрены в дальнейших исследованиях.

**Результаты.** Для тестирования предложенного метода в рамках данной работы разработан прототип программного решения [26]. Он реализует метод с некоторыми ограничениями (на данный момент в программе не рассматриваются ПП). Программное решение разработано на языке C# с применением .NET Framework 4.6.1. В программе используется библиотека ГА GeneticSharp [18]. Для поиска кратчайших путей на графе выбран алгоритм Дейкстры. Для реализации работы с графами и применения алгоритма Дейкстры использована библиотека QuickGraph [17]. Для визуализации графов применено приложение Graphviz [19].

При синтезе сети в рамках ГА использовался размер популяции в количестве 1000 особей. Каждой парой особей создавались потомки с 50% вероятностью как скрещивания, так и мутации. Однако разработанная программа позволяет изменять все описанные выше параметры ГА. Критерием останова в программе служило ограничение по количеству сгенерированных популяций. Также для ускорения работы метода было реализовано кэширование уже найденных кратчайших путей между вершинами графа, чтобы не про-

изводить их поиск повторно. С помощью описываемой программы был проведен ряд вычислительных экспериментов. Были синтезированы физические топологии сетей, близкие к оптимальным, с тестовой базой данных используемого оборудования. Для каждого графа выполнялся многократный запуск программы и выбирались наиболее часто встречающиеся (близкие) результаты по следующим критериям: (1) совпадают или близко выбраны места оптимального размещения КУ и УСПД, найденные вручную и с помощью программы; (2) совпадает или близко значение фитнес-функции, вычисленной вручную, с тем результатом, который выдает программа. Эти эксперименты проводились на следующих компьютерах:

- персональный компьютер с параметрами: процессор Intel Core i3-7100, 3.9 ГГц, 16 ГБ оперативной памяти;
- сервер с параметрами: Intel Xeon E5530, 2 процессора по 2.4 ГГц, 12 ГБ оперативной памяти.

Расчёт решения с вышеуказанным размером популяции в среднем занимал от 15 до 120 минут на тестовых примерах с различными размерами графа. Графы для экспериментов строились на основе аудита ряда предприятий г. Волгограда. Один из полученных результатов показан на рисунке 7.

Показанный граф построен на основе свойств метизного и пружинного цехов Волгоградского метизного завода. На нём производилась установка устройств учёта потребления электроэнергии, датчиков неинвазивного измерения потребления электроэнергии станками завода; реализация проводного и беспроводного сбора и передачи данных. В примере, результат которого показан на рисунке 7, было формализовано 12 участков – различные помещения цехов, а исходный граф состоял из 81 вершины и 196 граней.

На рисунке желтым цветом выделены вершины, располагающиеся на границах участков, зеленым – вершины с МУУ. Грани, проходящие через границы участков, выделены красным цветом, вдоль границ – оранжевым. Вершины в виде прямоугольников со сторонами, окрашенными в синий цвет, обозначают КУ. Вершины в виде прямоугольников со сторонами, окрашенными в красный цвет, обозначают УСПД. Если КУ и УСПД совмещены в одно устройство, то вершина с таким устройством обозначается в виде шестигранника. Для облегчения визуального анализа результирующего графа для каждого КПД добавляются дополнительные грани. Они изображают связи между устройствами и окрашены в один случайный цвет. В сгенерированном решении было выбрано единственное УСПД, которое размещено в одном из наиболее оптимальных мест. Это можно было определить визуально, исходя из весов трудоемкости вершин  $F_{мруд}$ . В результате был выбран способ получения данных на УСПД проводным способом по стандарту RS-485 и в виде электрических импульсов. В действительности данное решение было реализовано на предприятии в качестве оптимального. Тем не менее в ряде экспериментов на других объектах удавалось найти субоптимальные решения с применением беспроводных технологий.

Этот и другие проведённые вычислительные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что с помощью предлагаемого метода можно за время, не превышающее 120 минут, найти решения, близкие к оптимальным или даже оптимальные, для задач средней размерности (больше 50 вершин и 150 граней в графе) и большой размерности (больше 150 вершин и 400 граней в графе). Для повышения эффективности работы метода в дальнейшем необходимо реализовать собственный алгоритм селекции. В нём на каждом шаге скрещивание будет производиться только в рамках одной секции или группы секций (см. шаг 11 алгоритма), чтобы итеративно улучшать каждую из них в отдельности. Также было выявлено, что добавление только прямых (вертикальных и горизонтальных, но не диагональных) граней между узлами соседних участков (см. шаг 9), значительно упрощает граф. Это уменьшает количество связей между вершинами и исключает спорные ситуации при расчётах весов рёбер на стыках нескольких участков и в углах участков, где не всегда ясно, какую экспертную оценку брать для грани. Это приводит к погрешности при расчете расстояний беспроводных связей. Однако в рамках данного метода высокой точностью при расчете расстояний можно пренебречь, округляя их в большую сторону. Это позволит исключить ситуации «недосягаемости» вершин КПД.

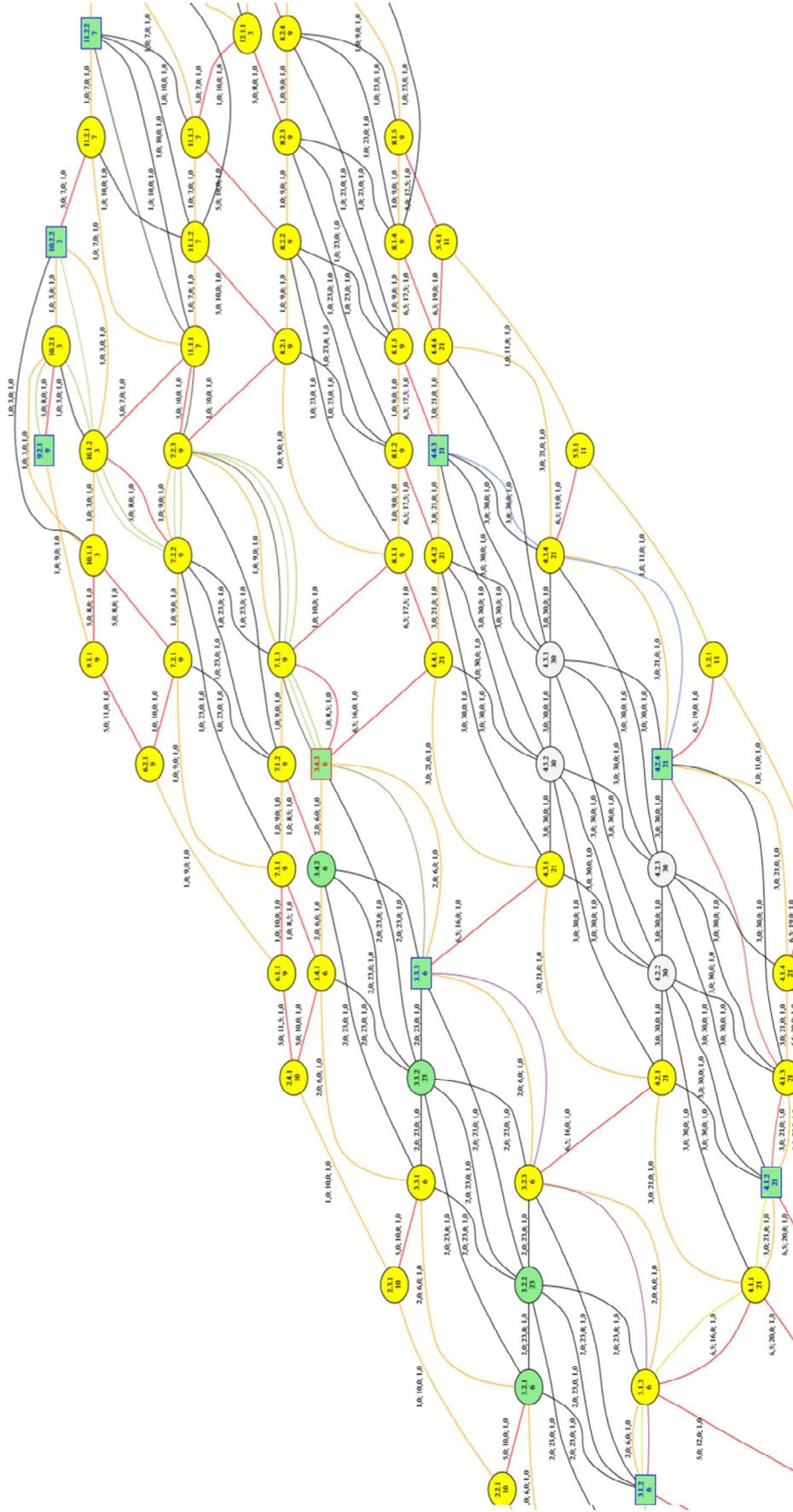


Рисунок 7 – Часть результирующего графа с выделенной различными цветами предлагаемой топологией сети

**Заключение.** В данной работе представлен новый метод ППР синтеза физической топологии сети АССПД для СЭМ. Он обеспечивает покрытие МУУ, указанных ЛПР на объектах машиностроительного предприятия, субоптимальной или оптимальной комбинацией устройств учёта потребления энергоресурсов и управления, а также сетью сбора и передачи данных с них. Синтез осуществляется так, чтобы минимизировать один из следующих параметров: финансовые затраты на приобретение и монтаж оборудования для системы; временные затраты на его монтаж; финансовые затраты на обслуживание системы; суммарные затраты при наличии значения стоимости выполнения часа работ. Предложенный метод отличается от существующих следующими достоинствами: (1) наличие формализации единиц применяемого оборудования для реализации дальнейшей их комбинации; (2) наличие формализации свойств объектов предприятия с применением множества экспертных оценок; (3) новое представление совокупности рассматриваемых объектов предприятия в виде взвешенного неориентированного графа; (4) применение ГА для получения близкой к оптимальной комбинации единиц оборудования, мест их размещения и найденных на графе кратчайших путей их объединения в сети сбора и передачи данных.

Для тестирования предложенного метода в рамках работы был разработан прототип программного решения, реализующего данный метод. С помощью программы был проведен ряд вычислительных экспериментов по синтезу оптимальной физической топологии сети. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что метод позволяет найти субоптимальные и оптимальные решения задач средней и большой размерности за время, не превышающее 120 минут.

Тестирование разработанного метода проводилось с использованием тестовой БД оборудования, а также свойств ряда различных предприятий и учреждений г. Волгограда, полученных путём их аудита, в частности, Волгоградского метизного завода. Одним из преимуществ разработанного метода является возможность получения близкого к оптимальному количеству используемых УСПД, что позволяет найти компромисс между сложностью физической топологии сети, а также стоимостью её реализации. Эффективность решения оценивается путём подсчёта количества используемых в решении КУ, КПД, ПП, УСПД и расчёта их суммарной стоимости при достижении выбранного ЛПР требования. Также оптимизация количества используемых УСПД способствует уменьшению количества точек доступа в сеть извне. Это ведёт к снижению вероятности несанкционированного проникновения в локальную сеть предприятия через УСПД и саму сеть сбора и передачи данных. Тем не менее, другие параметры безопасности, отказоустойчивость, быстродействие и объёмы передачи данных в данной работе не рассматриваются, однако они будут рассмотрены в дальнейших исследованиях.

#### Библиографический список

1. Байчаров С. Выбор технологии беспроводного обмена данными для решения задач автоматизации систем жизнеобеспечения офисно-производственных помещений / С. Байчаров // Беспроводные технологии. – 2009. – № 2. – С. 58–61.
2. Брумштейн Ю. М. Коммунальные системы городов: анализ целей и возможностей интеллектуализации управления на основе использования информационно-коммуникационных технологий / Ю. М. Брумштейн, В. Ю. Гайфитдинова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 1. – С. 39–52. – Режим доступа: [http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(37\)/39-52.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(37)/39-52.pdf), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
3. Важаев К. В. Интеллектуальная система жилых зон на основе информационно-измерительных систем управления / К. В. Важаев, В. Х. Абдрахманов, Р. Б. Салихов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – Т. 12, № 2. – С. 70–75.
4. Зыков Д. Д. Обзор комплексных решений в сфере учета энергоресурсов / Д. Д. Зыков, Д. Р. Уразаев, Н. Ю. Хабибулина // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 131–133.
5. Камаев В. А. Интеллектуальные системы автоматизации управления энергосбережением / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, А. Бребельс // Открытое образование. – 2011. – № 2–2. – С. 227–231.
6. Камаев В. А. Конвергентная модель сбора и распределенной обработки данных в системах энергетического мониторинга / В. А. Камаев, Е. А. Финогеев, А. Г. Финогеев, И. С. Нефедова, А. А. Финогеев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 3. – С. 58–75.
7. Курейчик В. В. Теория эволюционных вычислений / В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, С. И. Родзин. – Москва: Физматлит, 2012.
8. Кычкин А. В. Долгосрочный энергомониторинг на базе программной платформы OpenJEvIs / А. В. Кычкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 1 (9). – С. 5–15.
9. Кычкин А. В. Модель синтеза структуры автоматизированной системы сбора и обработки данных на базе беспроводных датчиков / А. В. Кычкин // Автоматизация и современные технологии. – 2009. – № 1. – С. 15–20.
10. Москвитин С. П. Построение систем телеметрии промышленного назначения с использованием беспроводных сенсорных сетей / С. П. Москвитин, Д. В. Комаров // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В. И. Вернадского. – 2014. – № 52. – С. 87–91.
11. Мочалов В. А. Гибридный бионический алгоритм синтеза структуры беспроводной сенсорной сети / В. А. Мочалов // T-COMM: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Т. 7, № 10. – С. 72–77.

12. Николаев П. Л. Архитектура интегрированной в облачную среду системы управления умным домом / П. Л. Николаев // Программные продукты и системы. – 2015. – № 2 (110). – С. 65–69.
13. Сергушев А. Г. Отказоустойчивая сенсорная сеть для систем безопасности потенциально опасных промышленных объектов / А. Г. Сергушев // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2015. – № 12 (173). С. 149–161.
14. Троицкий-Марков Т. Е. Принципы построения системы мониторинга энергоэффективности / Т. Е. Троицкий-Марков, Д. В. Сенновский // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2011. – Т. 4. – С. 34–39.
15. Шахов В. В. Эффективный метод генерации случайных геометрических графов для моделирования беспроводных сетей / В. В. Шахов, А. Н. Юргенсон, О. Д. Соколова // Прикладная дискретная математика. – 2016. – № 4 (34). – С. 99–109.
16. Alahakoon D. Smart Electricity Meter Data Intelligence for Future Energy Systems: A Survey / D. Alahakoon, X. Yu // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2016. – vol. 12, № 1. – P. 425–436.
17. Generic Graph Data Structures and Algorithms for .NET. – Режим доступа: <https://github.com/YaccConstructor/QuickGraph>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 14.10.2018).
18. GeneticSharp is a fast, extensible, multi-platform and multithreading C# Genetic Algorithm library that simplifies the development of applications using Genetic Algorithms (GAs). – Режим доступа: <https://github.com/giacomelli/GeneticSharp>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (Дата обращения: 14.10.2018).
19. Graphviz – Graph Visualization Software. – Режим доступа: <https://www.graphviz.org/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 14.10.2018).
20. Ilic D. Sensing in power distribution networks via large numbers of smart meters / D. Ilic, S. Karnouskos, P. G. D. Silva // 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). – 2012. – P. 1–6.
21. Jiang, X. Design and implementation of a high-fidelity ac metering network / X. Jiang, S. Dawson-Haggerty, P. Dutta, D. Culler // Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '09. – 2009. – P. 253–264.
22. McCall J. Genetic algorithms for modelling and optimization / J. McCall // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2005. – Vol. 184, issue 1. – P. 205–222.
23. Ni D. C. Integration of wired and wireless lighting control systems for green energy management / D. C. Ni, P. Chen // International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC). – 2017. – P. 206–210.
24. Soni N. Study of Various Mutation Operators in Genetic Algorithms / N. Soni, T. Kumar // (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies. – 2014. – Vol. 5 (3). – P. 4519–4521.
25. Tian J. Wireless sensor network node optimal coverage based on improved genetic algorithm and binary ant colony algorithm / J. Tian, M. Gao, G. Ge // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016. – P. 104.
26. Topology-model, Alexander Sokolov. – Режим доступа: <https://github.com/SashkaCosmonaut/topology-model>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 14.02.2019).
27. Valli P. Genetic Algorithm based equipment selection method for construction project using MATLAB tool / P. Valli, C. A. Jeyasehar // International Journal of Optimization in Civil Engineering. – 2012. – Vol. 2 (2). – P. 235–246.

#### References

1. Baycharov S. Vybor tekhnologii besprovodnogo obmena dannymi dlya resheniya zadach avtomatizatsii sistem zhizneobespecheniya ofisno-proizvodstvennykh pomeshcheniy [The choice of wireless data exchange technology for solving problems of automating life support systems for office and production premises]. *Besprovodnye tekhnologii* [Wireless Technologies], 2009, no. 2, pp. 58–61.
2. Brumshteyn Yu. M., Gayfitdinova V. Yu. Kommunalnye sistemy gorodov: analiz tseley i vozmozhnostey intellektualizatsii upravleniya na osnove ispolzovaniya informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologiy [Municipal systems of the cities: the analysis of the purposes and opportunities of intellectualization of management on the basis of use of information and communication technologies]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2017, no. 1, pp. 39–52. Available at: [http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1\(37\)/39-52.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/1(37)/39-52.pdf).
3. Vazhdaev K. V., Abdrakhmanov V. Kh., Salihov R. B. Intellektualnaya sistema zhilykh zon na osnove informatsionno-izmeritelnykh sistem upravleniya [Intellectual system of residential zones based on information-measuring control systems]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrotechnical and Information Systems and Systems], 2016, vol. 12, no. 2, pp. 70–75.
4. Zykov D. D., Urazaev D. R., Khabibulina N. Yu. Obzor kompleksnykh resheniy v sfere ucheta energoresursov [Overview of Integrated Solutions in the Field of Energy Accounting]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2017, vol. 20, no. 4, pp. 131–133.
5. Kamaev V. A., Shcherbakov M. V., Brebels A. Intellektualnye sistemy avtomatizatsii upravleniya energosberezheniem [Intelligent Energy Saving Control Automation Systems]. *Otkrytoe obrazovanie* [Open Education], 2011, no. 2–2, pp. 227–231.
6. Kamaev V. A., Finogeev E. A., Finogeev A. G., Nefedova I. S., Finogeev A. A. Konvergentnaya model sbora i raspredelennoy obrabotki dannykh v sistemakh energeticheskogo monitoringa [Convergent model of collection and distributed data processing in energy monitoring systems]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 3, pp. 58–75.
7. Kureychik V. V., Kureychik V. M., Rodzin S. I. *Teoriya evolyutsionnykh vychisleniy* [Evolutionary Theory]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012.

8. Kychkin A. V. Dolgosrochnyy energomonitoring na baze programmnoy platformy OpenJEVis [Long-Term Energy Monitoring Based on the Openjevis Software Platform]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems], 2014, no. 1 (9), pp. 5–15.
9. Kychkin A. B. Model sinteza struktury avtomatizirovannoy sistemy sbora i obrabotki dannykh na baze besprovodnykh datchikov [Model of Synthesis of the Structure of an Automated Data Acquisition and Processing System Based on Wireless Sensors]. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii* [Automation and Modern Technology], 2009, no. 1, pp. 15–20.
10. Moskvitin S. P., Komrakov D. V. Postroenie sistem telemektrii promyshlennogo naznacheniya s ispolzovaniem besprovodnykh sensorykh setey [Building Telemetry Systems for Industrial Use Using Wireless Sensor Networks]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet imeni V. I. Vernad'skogo* [Questions of Modern Science and Practice. V. I. Vernadsky University], 2014, no. 52, pp. 87–91.
11. Mochalov V. A. Gibridnyy bionicheskiy algoritm sinteza struktury besprovodnoy sensornoy seti [Hybrid Bionicle Algorithm for Synthesizing the Structure of a Wireless Sensor Network]. *T-COMM: Telekommunikatsii i transport* [T-COMM: Telecommunications and Transportation], 2013, vol. 7, no. 10, pp. 72–77.
12. Nikolaev P. L. Arkhitektura integrirovannoy v oblachnyuyu sredu sistemy upravleniya umnym domom [Architecture of the Smart Home Control System Integrated into the Cloud Environment]. *Programmye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 2015, no. 2 (110), pp. 65–69.
13. Sergushev A. G. Otkazoustoychivaya sensornaya set dlya sistem bezopasnosti potentsialno opasnykh promyshlennykh obektov [Fail-safe Sensor Network for Security Systems of Potentially Hazardous Industrial Facilities]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki* [News of Southern Federal University. Technical Science], 2015, no. 12 (173), pp. 149–161.
14. Troickiy-Markov T. E., Sennovskiy D. V. Printsipy postroeniya sistemy monitoringa energoeffektivnosti [Principles of Building an Energy Efficiency Monitoring System]. *Monitoring. Nauka i bezopasnost* [Monitoring. Science and Security], 2011, vol. 4, pp. 34–39.
15. Shakhov V. V., Yurgenson A. N., Sokolova O. D. Effektivnyy metod generatsii sluchaynykh geometricheskikh grafov dlya modelirovaniya besprovodnykh setey [Efficient Method of Generating Random Geometric Graphs for Modeling Wireless Networks]. *Prikladnaya diskretnaya matematika* [Applied Discrete Mathematics], 2016, no. 4 (34), pp. 99–109.
16. Alahakoon D., Yu X. Smart Electricity Meter Data Intelligence for Future Energy Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 425–436.
17. Generic Graph Data Structures and Algorithms for .NET. Available at: <https://github.com/YaccConstructor/QuickGraph> (accessed 14.10.2018).
18. GeneticSharp is a fast, extensible, multi-platform and multithreading C# Genetic Algorithm library that simplifies the development of applications using Genetic Algorithms (GAs). Available at: <https://github.com/giacomelli/GeneticSharp> (accessed 14.10.2018).
19. Graphviz – Graph Visualization Software. Available at: <https://www.graphviz.org/> (accessed 14.10.2018).
20. Ilic D., Karnouskos S., Silva P. G. D. Sensing in power distribution networks via large numbers of smart meters. *3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 2012, pp. 1–6.
21. Jiang, X., Dawson-Haggerty S., Dutta P., Culler D. Design and implementation of a high-fidelity ac metering network. *Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '09*, 2009, pp. 253–264.
22. McCall J. Genetic algorithms for modelling and optimization. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2005, vol. 184, issue 1, pp. 205–222.
23. Ni D. C., Chen. P. Integration of wired and wireless lighting control systems for green energy management. *International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*, 2017, pp. 206–210.
24. Soni N., Kumar T. Study of Various Mutation Operators in Genetic Algorithms. *(IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2014, vol. 5 (3), pp. 4519–4521.
25. Tian J., Gao M., Ge G. Wireless sensor network node optimal coverage based on improved genetic algorithm and binary ant colony algorithm. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016, pp. 104.
26. Topology-model, Alexander Sokolov. Available at: <https://github.com/SashkaCosmonaut/topology-model> (accessed 14.02.2019).
27. Valli P., Jeyasehar C. A. Genetic Algorithm based equipment selection method for construction project using MATLAB tool. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 2012, vol. 2 (2), pp. 235–246.