

УДК 519.6

**Определение числа и мест строительства
подстанций при решении задачи
перспективного развития городской
распределительной сети энергоснабжения**

профессор, д.ф.-м.н. Карпенко А. П.¹,
Кузьмина И. А.^{1,*}

[*kuzminainna@yandex.ru](mailto:kuzminainna@yandex.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Целью работы является разработка алгоритмов решения задачи определения числа и мест строительства новых подстанций при решении задачи перспективного развития городских распределительных сетей энергоснабжения. В статье представлена математическая постановка задачи в виде оптимизационной задачи дискретного программирования. Описаны три разработанных авторами алгоритма решения поставленной задачи: алгоритм, основанный на методе k-средних; алгоритм, реализующий метод разделительной кластеризации; эвристический алгоритм. Произведен сравнительный анализ эффективности работы алгоритмов по двум индикаторам: число построенных подстанций, время вычислений.

Ключевые слова: городская распределительная сеть энергоснабжения; строительство подстанций; разделительная кластеризация, метод k-средних

Введение

Задача перспективного развития городской распределительной сети электроснабжения подразумевает определение оптимального варианта развития сети, учитывающего темпы развития городской инфраструктуры [1]. При этом имеется в виду такой вариант развития сети, при котором при наименьших затратах на ее строительство и эксплуатацию будет обеспечен заданный уровень надежности и качества передаваемой электроэнергии [2].

Ввиду сложности и многомерности современных сетей электроснабжения, многовариантности и многокритериальности, задача обоснования перспективного развития городской распределительной сети электроснабжения является плохоформализованной, требует для своего решения очень высоких вычислительных затрат, с практической точки зрения является труднопреодолимой [3].

Предложенная авторами модель сети энергоснабжения и математическая постановка задачи приведены в работе [4]. В работе [5] авторами предложены методы решения задачи

перспективного развития сетей энергоснабжения, сводящие исходную задачу к совокупности трех подзадач:

- задача определения оптимального числа и мест строительства новых трансформаторных и распределительных подстанций (ТП и РП соответственно);
- задача отыскания оптимального варианта подключения новых потребителей к сети энергоснабжения;
- задача поиска схемы включения построенных в ходе решения задачи 1 ТП в существующую сеть энергоснабжения.

В данной статье рассмотрены алгоритмы решения первой из указанных задач.

В литературе предложено большое число возможных методов решения задач данного сорта. При этом, как правило, задача ставится как задача определения условного центра электрических нагрузок [6 – 8]. В зависимости от метода, в качестве этого центра используют геометрический центр тяжести (без учета мощностей потребителей) или нагрузочный центр тяжести (с учетом мощностей потребителей).

Значительное внимание уделено данному вопросу и в зарубежной литературе. Так, в работах [9, 10] для выбора оптимального местоположения подстанции используется метод ветвей и границ, в работе [11] для решения задачи применены методы целочисленного программирования, работа [12] посвящена решению задачи с использованием методов линейного программирования. Известны работы, в которых для определения мест строительства новых подстанций применяются эвристические, генетические и эволюционные алгоритмы.

Основными недостатками предлагаемых в известных публикациях методов является отсутствие учета ограничений на размещение новых подстанций, а также возможность их применения лишь для построения единичной подстанции. Предложенные в статье алгоритмы решения задачи лишены указанных недостатков.

1. Постановка задачи

Задача заключается в определении числа и мест расположения новых ТП и РП, строительство которых необходимо для обеспечения всех новых потребителей возможностью подключения к сети энергоснабжения.

Все подключаемые к сети энергоснабжения потребители по уровню запрашиваемого напряжения разделены на две группы – потребители, подключение которых производится к РП на уровне напряжения 10 кВ, и потребители, подключение которых производится к ТП на уровне напряжения 0,4 кВ, соответственно. Вопросы определения мест строительства ТП и РП в общем случае независимы друг от друга и могут быть рассмотрены последовательно – сначала для объектов одного типа, затем другого. Рассмотренные ниже алгоритмы подразумевают решение задачи в части строительства ТП, однако могут быть применены для решения задачи строительства РП.

Исходным для задачи является набор потребителей C' , подключение которых к существующим ТП не представляется возможным ввиду отсутствия у подстанций достаточного объема свободной мощности или свободных мест для подключения:

$$C' = \{C_i, i \in [1:|C'|]\}.$$

Здесь C_i – i -ый подключаемый потребитель; $|C'|$ – число подключаемых к сети потребителей, подключение которых к сети энергоснабжения не представляется возможным. Также заданным является множество возможных мест строительства новых ТП O .

Результатом решения задачи является множество новых ТП $T^{\text{нов}}$.

Вектор варьируемых параметров задачи имеет вид

$$X = \{(x_i, y_i), X_{\text{нов}}^T, i \in [1: X_{\text{нов}}^T]\}.$$

Здесь (x_i, y_i) – географические координаты i -ой новой ТП; $X_{\text{нов}}^T$ – число ТП, строительство которых необходимо произвести.

Ставится задача определения в области допустимых значений вектора варьируемых параметров D , такого значения вектора X , при котором будет обеспечен минимум критерия оптимальности $Z(X)$

$$\min_{X \in D} Z\left(\overset{*}{X}\right) = \min_{X \in D} Z(X).$$

Разработаны следующие алгоритмы решения задачи: алгоритм, реализующий метод k -средних; алгоритм, основанный на разделительной кластеризации; эвристический алгоритм.

2. Алгоритмы решения задачи

2.1 Алгоритм на основе метода k -средних

Метод k -средних – популярный неиерархический метод кластеризации, позволяющий разделить объекты на заданное заранее число кластеров. Основная его идея заключается в том, что на каждой итерации объекты делятся на кластеры по принципу наименьшего расстояния от центр масс кластера, с последующим перераспределением полученных на предыдущем шаге центров кластеров. К недостаткам метода можно отнести необходимость предварительного определения числа кластеров, а также зависимость результата решения от выбранных изначально центров кластеров. Достоинством метода является простота и низкие вычислительные затраты.

Схема алгоритма, реализующего указанный метод, приведена на рис. 1. Здесь $N^{\text{кластер}}$ – число кластеров, на которое необходимо разделить элементы множества C' ; R^{max} – максимальное число попыток решения задачи с заданным числом кластеров.

На первом шаге алгоритма ($\tau=1$) из множества O случайным образом выбираем $N^{\text{кластер}}$ точек, которые объявляем центрами кластеров (центроидами).

На следующем шаге каждого потребителя множества C' относим к одному из кластеров по принципу наименьшего удаления от центра кластера. Иными словами, потребителя C_i относим к j -му кластеру, если для этого потребителя расстояние до центроида j -ого кластера меньше, чем до любого другого.

Далее для каждого из полученных кластеров рассчитываем его нагрузочный центр тяжести и из множества O выбираем точку, наиболее близко расположенную ему; указанную точку принимаем за новый центроид кластера. Далее производим перераспределение потребителей по описанному выше принципу.

Процесс кластеризации завершается, когда на очередном шаге τ работы алгоритма, координаты ни одного из центров кластеров не изменятся.

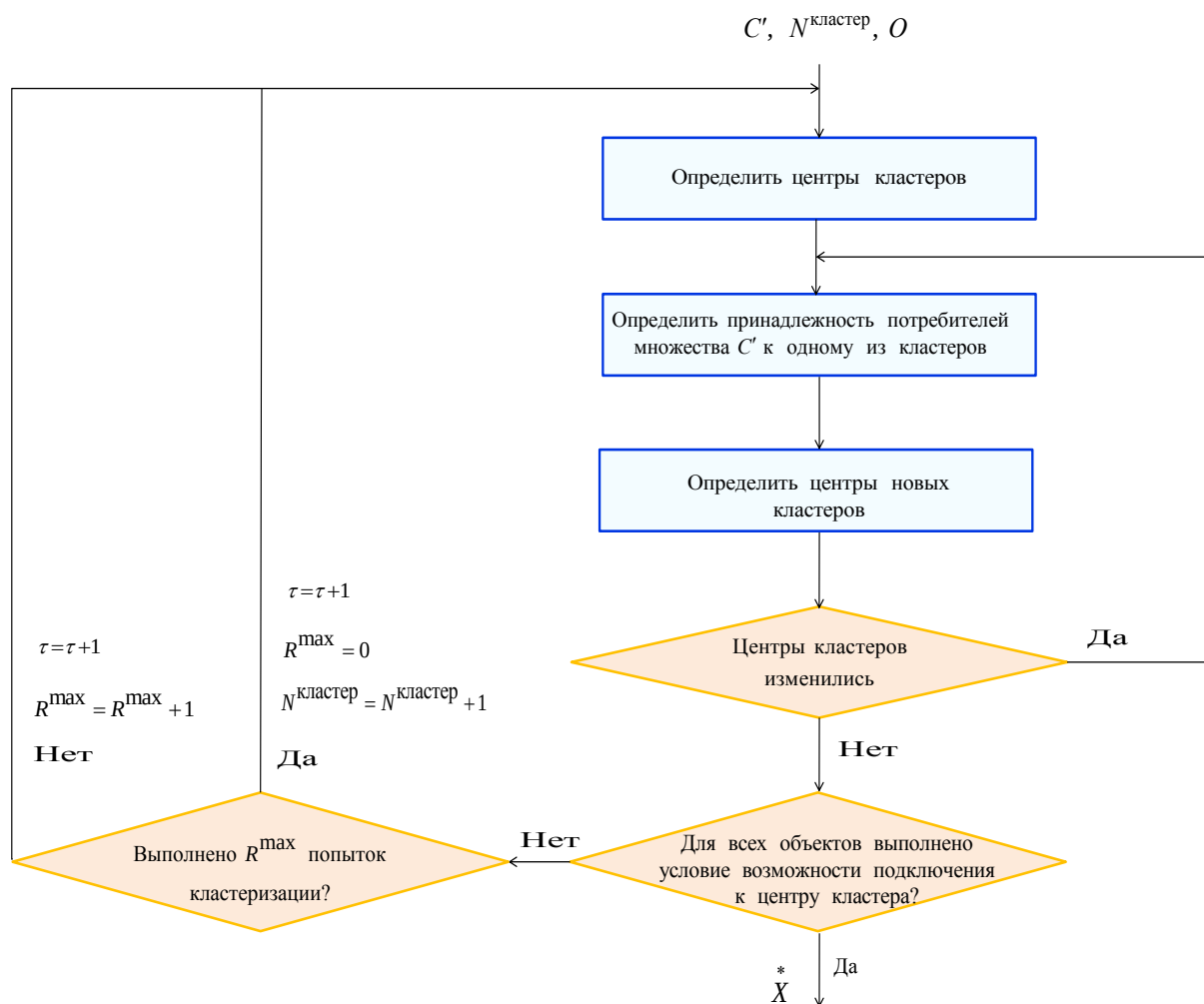
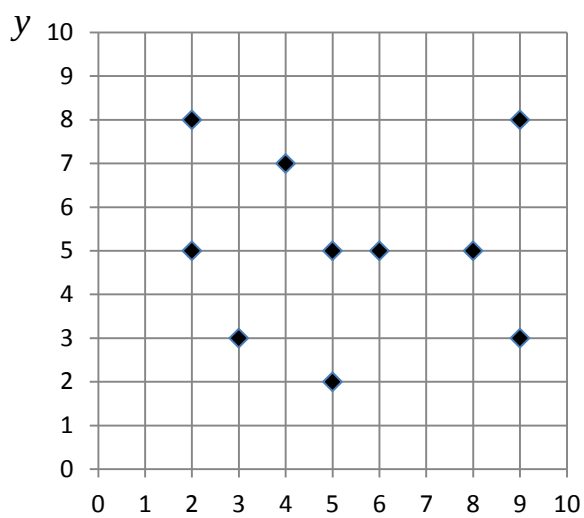


Рис. 1. Схема алгоритма, реализующего метод k -средних

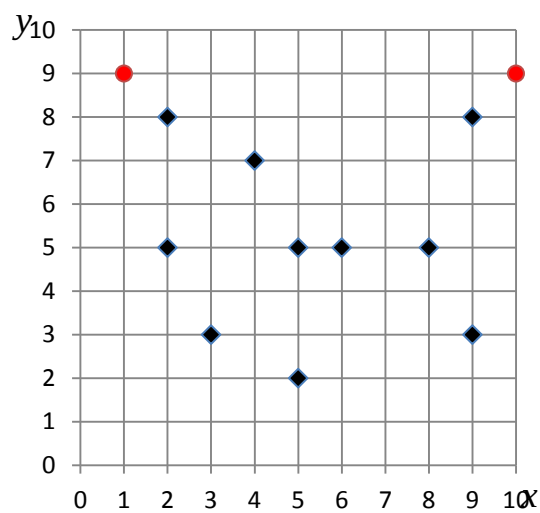
Полученное решение проверяем на допустимость – все потребители должны иметь возможность подключения к центроиду кластера, к которому они отнесены. При выполнении данного условия за решение принимаются $X_{\text{нов}}^T = N^{\text{клартер}}$, места строительства новых ТП, совпадают с центрами кластеров.

Если условие допустимости решения не выполнено, производится повторная попытка кластеризации с новыми начальными кластерными центрами. Максимальное число попыток кластеризации с исходным значением числа кластеров $N^{\text{кластер}}$ задает R^{max} . После R^{max} неудачных попыток кластеризации, число кластеров увеличивается на 1: $N^{\text{кластер}} = N^{\text{кластер}} + 1$.

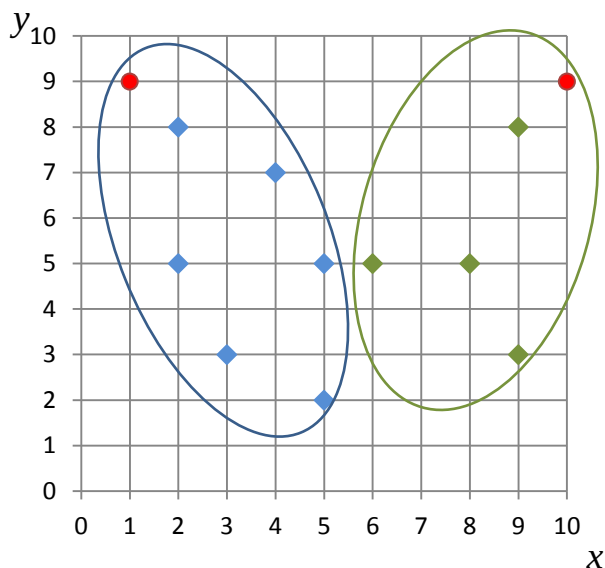
Алгоритм, реализующий кластеризацию методом метод k -средних, иллюстрирует рис. 2. Принимаем, что возможные места строительства новых ТП (элементы множества O) расположены во всех узлах координатной сетки; $N^{\text{кластер}} = 2$.



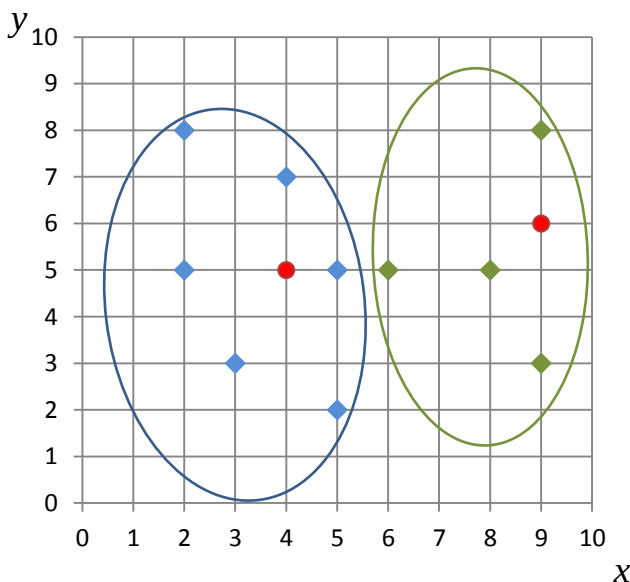
а) Исходные данные



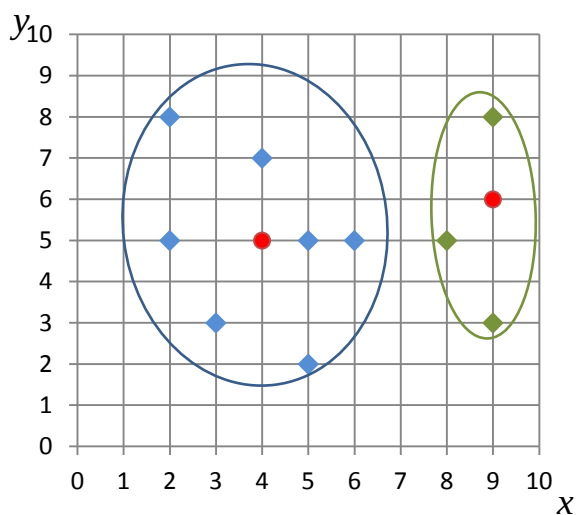
б) Определение начальных центров кластеров



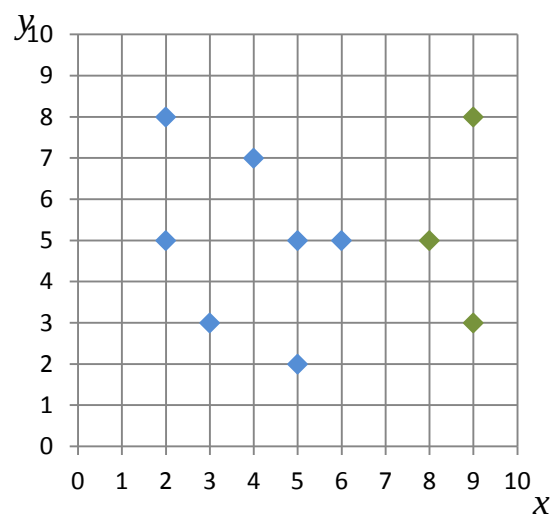
в) Определение принадлежности объектов к одному из кластеров



г) Пересчет кластерных центров



д) Перераспределение объектов и перерасчет центров кластеров



е) Результаты кластеризации

Рис. 2. Пример работы алгоритма, реализующего метод k -средних:

◆ – кластеризуемый объект; ● – кластерный центр; ○ – условная граница кластера

2.2.Алгоритм, реализующий метод разделительной кластеризации

Метод разделительной кластеризации относится к иерархическим кластеризационным методам, достоинством которого, по сравнению с методом k -средних, является отсутствие необходимости задания числа кластеров. В случае разделительной кластеризации процесс решения задачи начинается с объединения всех объектов в один кластер, который впоследствии расщепляется до тех пор, пока каждый объект не окажется в отдельном кластере или не будет выполнено условие остановки.

К недостаткам метода можно отнести их высокие вычислительные затраты и, следовательно, возможность их применения для кластеризации небольшого числа объектов. Достоинства метода заключаются в отсутствии необходимости предварительного определения числа кластеров.

Схема алгоритма, реализующего описанный метод, приведена на рис. 3.

На первом шаге работы алгоритма все объекты множества S' объединяем в один кластер и проводим проверку возможности строительства ТП в некоторой точке $O_i \in O$ таким образом, чтобы были удовлетворены условия возможности подключения для всех потребителей в кластере. Если данное условие выполнено, алгоритм прекращает работу, и в точке O_i определяем местом строительства новой ТП.

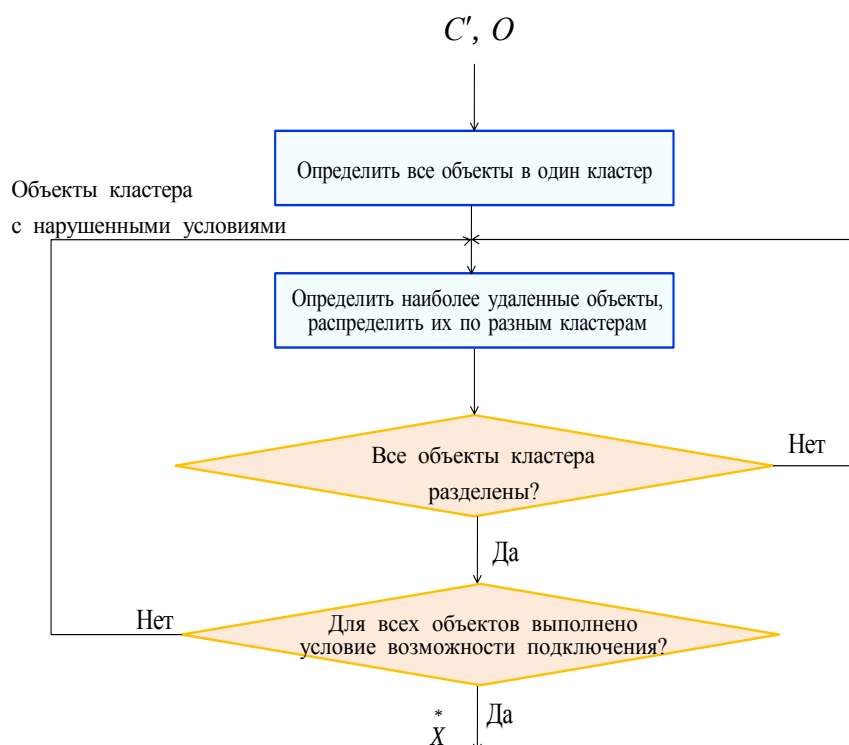


Рис. 3. Схема алгоритма, реализующего метод разделительной кластеризации

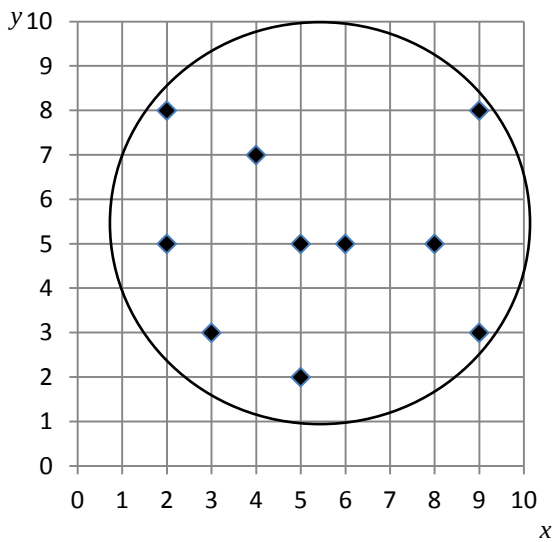
В случае если указанное выше условие не выполняется, то исходный кластер делим на два кластера по следующему правилу.

1) Определяем пару потребителей множества C' , расстояние между которыми больше, чем между любыми другими потребителями этого множества. Каждый из выбранных потребителей образует кластер и является его центроидом. Этих потребителей исключаем из дальнейшего рассмотрения.

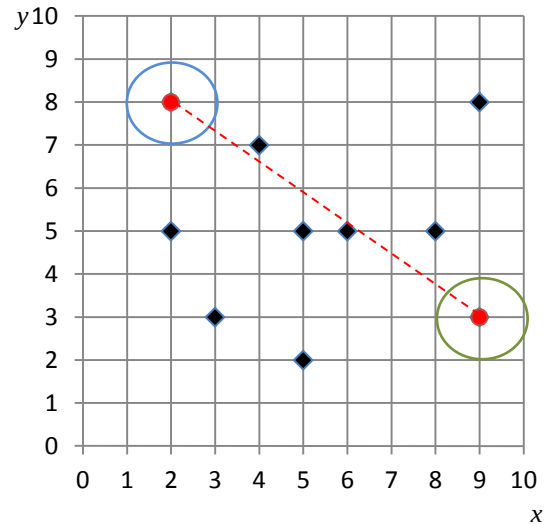
2) Определяем еще одну пару потребителей множества C' , расстояние между которыми больше, чем между любыми другими потребителями. Разносим этих потребителей по образованным на предыдущем шаге кластерам: первым к кластеру относим объект, наиболее близко расположенный к одному из центроидов; второго потребителя относим к другому кластеру. Данную процедуру выполняем последовательно до тех пор, пока из рассмотрения не будут исключены все потребители. Если потребителей нечетное число, то последнего оставшегося потребителя относим к кластеру, к центроиду которого он расположен ближе.

Для полученных в результате деления кластеров производим проверку возможности строительства в кластере ТП таким образом, чтобы все потребители кластера имели возможность подключения к ней. Если указанное условие не выполняется, то данный кластер делим на два кластера по описанной выше схеме. Алгоритм продолжает работу до тех пор, пока для всех выделенных кластеров не будет выполнено условие возможности строительства новой ТП и подключения к ней всех потребителей.

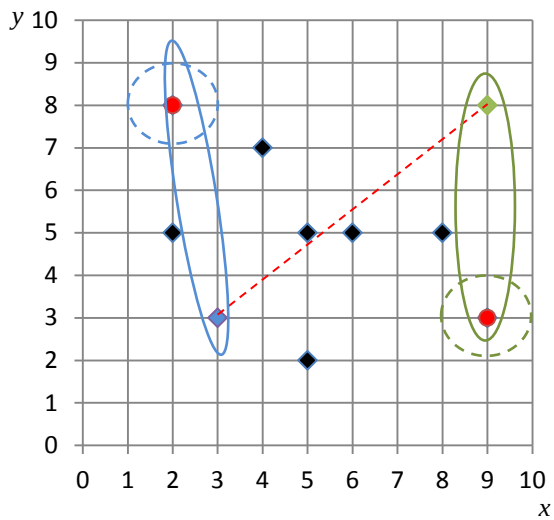
Процедуру деления кластера иллюстрирует рис. 4.



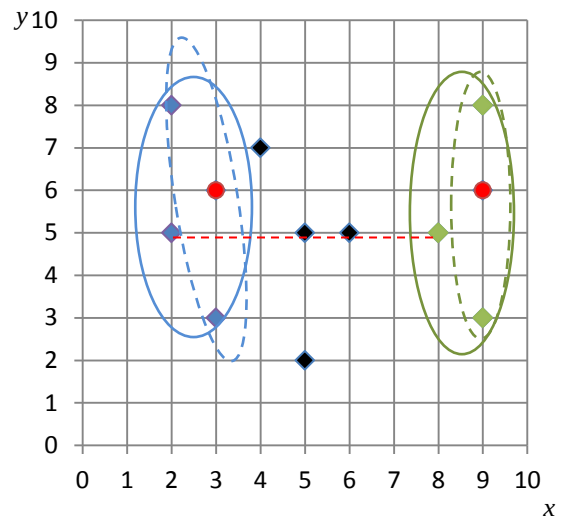
а) Исходные данные. Объединение всех объектов в один кластер



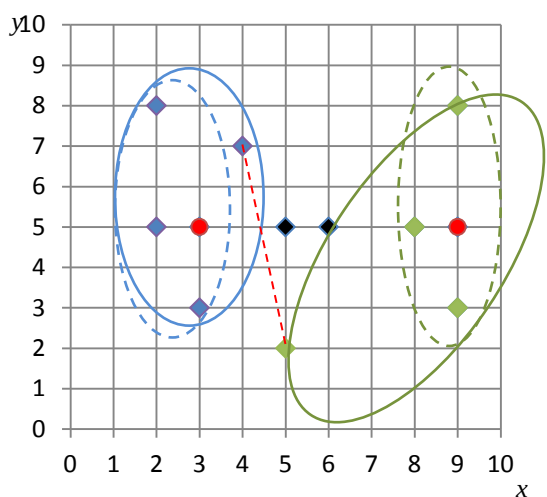
б) Деление исходного кластера на два единичных кластера



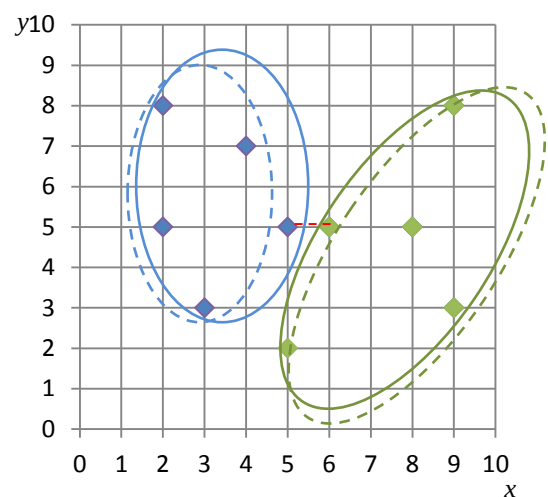
в) Добавление в кластеры двух наиболее удаленных объектов



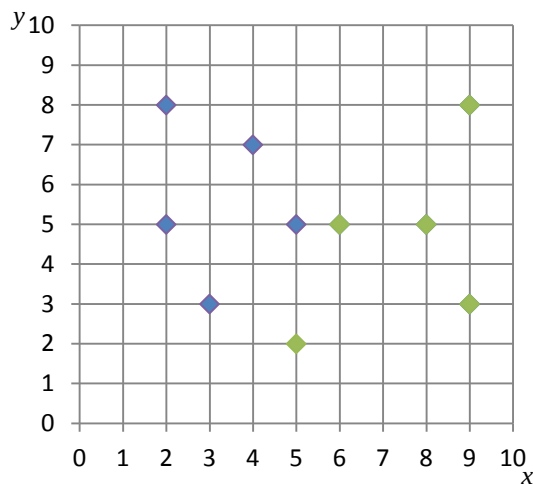
г) Перерасчет центров кластеров. Добавление в кластеры двух наиболее удаленных объектов



д) Перерасчет центров кластеров. Добавление в кластеры двух наиболее удаленных объектов



е) Перерасчет центров кластеров. Добавление в кластеры двух наиболее удаленных объектов



ж) Результат кластеризации

Рис. 4. Пример деления кластера в алгоритме разделительной кластеризации:

◆ – кластеризуемый объект; ● – кластерный центр; ○, ○ – условные границы имеющегося и нового кластеров соответственно; – расстояние между наиболее удаленными объектами

2.3 Эвристический алгоритм

Алгоритм реализует последовательное определение мест строительства новых ТП, при этом на каждом шаге производится попытка определения такого расположения новой ТП, при котором будет обеспечена возможность подключения максимального числа потребителей.

Основным достоинством алгоритма является его простота и невысокие вычислительные затраты.

Схема эвристического алгоритма решения задачи приведена на рис. 5. Здесь $N^{\max}$ – максимальное число потребителей, которые могут быть подключены к ТП.

На первом шаге алгоритма выбираем точку $O_i \in O$ и $N^{\max}$ потребителей, наиболее близко расположенных к ней.

Если для всех $N^{\max}$ выбранных потребителей выполняется условие возможности их подключения к ТП с координатами строительства равными (x_i, y_i) , то точку O_i назначаем местом строительства новой подстанции, а все отобранные на предыдущем шаге объекты удаляем из множества C' . В случае, если условия возможности подключения не выполнены (например, суммарная допустимая мощность потребителей превышает максимальную возможную мощность подстанции), из множества отобранных элементов исключаем наиболее удаленного от O_i потребителя и производим повторную проверку ограничений.

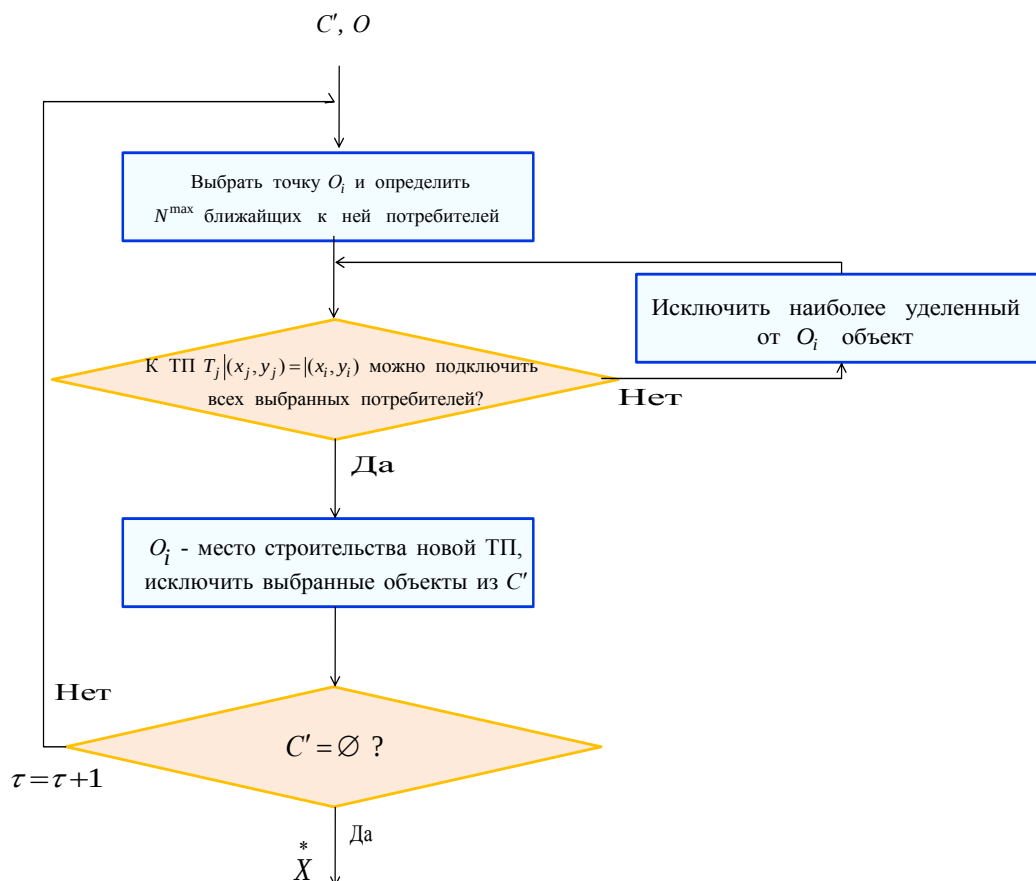
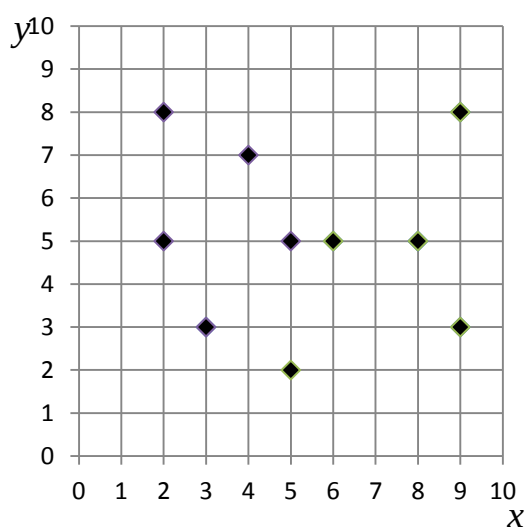
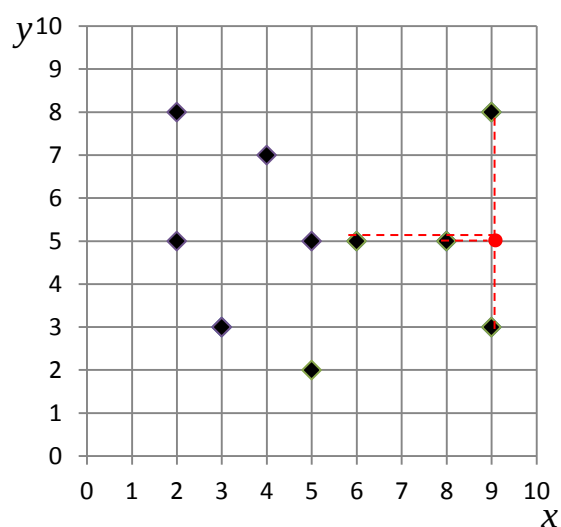


Рис. 5. Схема эвристического алгоритма строительства новых ТП

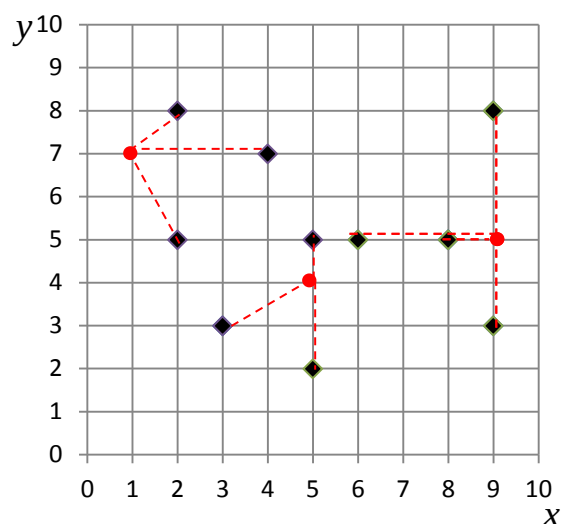
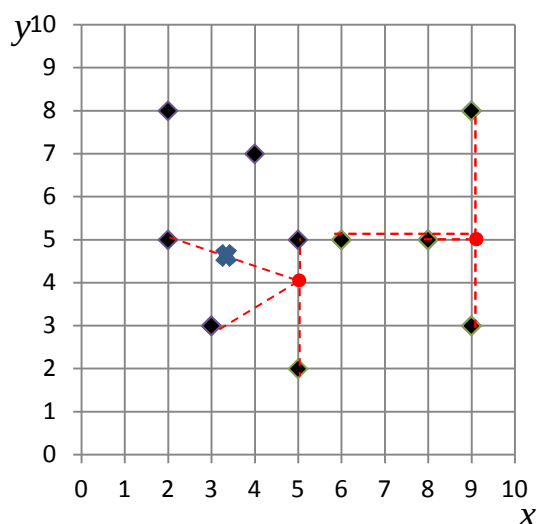
Алгоритм заканчивает работу, когда из множества C' будут исключены все элементы. Работу алгоритма иллюстрирует рис. 6. Считаем, что возможные места строительства новых ТП – все узлы координатной сетки; $N^{\max} = 4$, $l^{\lim} = 3$ ед. (1 ед. = 1 делению сетки).



а) Исходные данные



б) Выбор первого места возможно строительства ТП
 $O_i \in O$ и $N^{\max}$ потребителей, наиболее близких к нему



в) Выбор второго места возможно строительства ТП
 $O_i \in O$ и $N^{\max}$ потребителей, наиболее близких к нему

г) Выбор третьего места возможно строительства ТП
 $O_i \in O$ и $N^{\max}$ потребителей, наиболее близких к нему.
 Результат работы алгоритма

Рис. 6. Иллюстрация результатов работы эвристического алгоритма строительства новых ТП:

◆ – подключаемый потребитель; ● – выбранная точка $O_i \in O$;
 ✕ – исключение объекта, расположенного на расстоянии более $l_{\lim}$ от выбранной точки

3. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов

Оценка эффективности разработанных алгоритмов производится в программном комплексе ELNET, реализующем автоматизированное решение задачи перспективного развития городской распределительной сети энергоснабжения с учетом перспектив развития города. Основные характеристики использованием ЭВМ, на которой проводились эксперименты, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики используемой ЭВМ

Характеристика	Значение
Процессор:	<i>IntelCorei5</i>
число ядер	2
частота процессора, ГГц	1,6
Емкость жесткого диска, ГБ	34,36
Оперативная память (ОЗУ), МБ	512
Графический процессор	<i>Intel HD Graphics 3000</i>

Анализ эффективности алгоритмов выполнен на наборе из пяти тестовых карт, состоящих из 100 подключаемых потребителей и 100 возможных мест строительства ТП каждая.

Пример карты приведен на рис. 7.

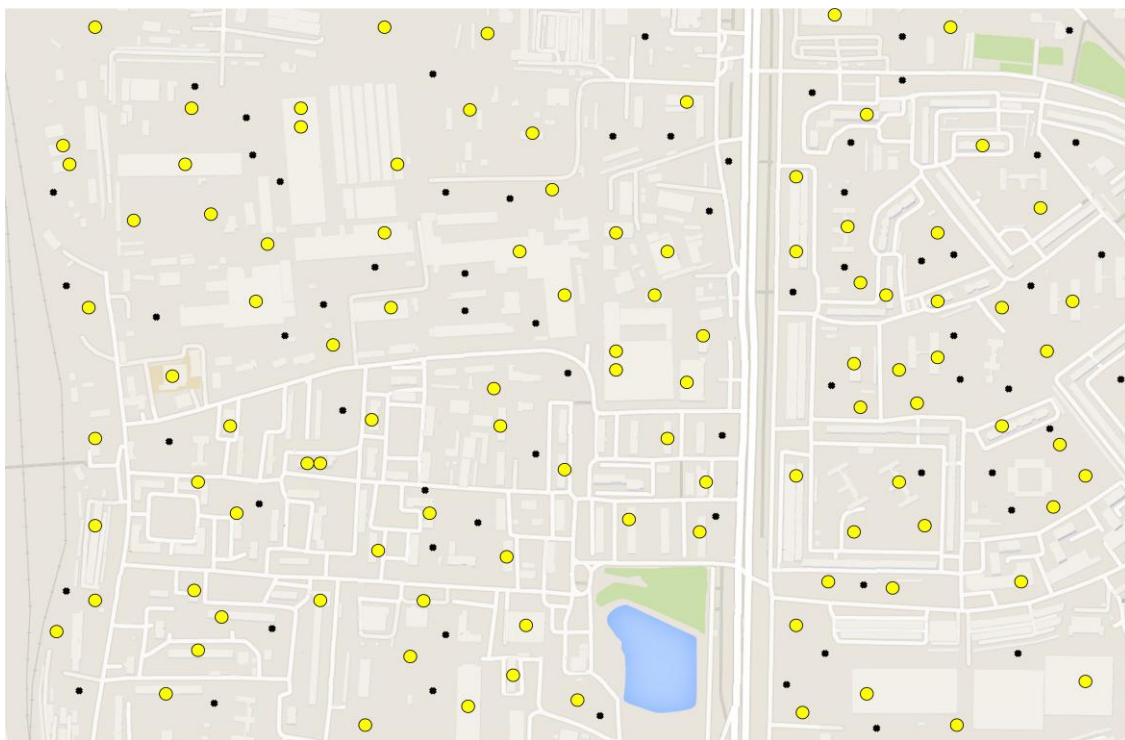


Рис. 7. Пример карты: ● – подключаемый потребитель; ● – место возможного строительства ТП

Каждый подключаемый к сети энергоснабжения потребитель $C_i \in C'$ характеризуется следующими параметрами:

- 1) Географические координаты $(x_i; y_i)$;
- 2) Требуемая мощность P_i ;

Характеристикой каждой точки возможного места строительства ТП $O_i \in O$ являются их географические координаты $(x_i; y_i)$.

С целью получения усредненных значений, для эвристического алгоритма и алгоритма, реализующего метод k -средних, выполнено 20 запусков расчетов для каждой тестовой карты.

Основные параметры расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры расчетов

Параметр	Значение
Максимальная возможная длина КЛ l_{lim} , м	300
Максимальное число N^{max} подключений к ТП (0,4 кВ), шт.	10
Максимальная мощность P^{max} трансформатора, установленного на ТП, кВА	1250
Минимальное число $N^{\text{кластер}}$ кластеров (для алгоритма k -средних), шт.	10
Число попыток подобрать решение до увеличения числа кластеров R^{max} , шт.	20

В качестве критериев оценки эффективности алгоритмов используем два индикатора:

- число ТП, строительство которых необходимо произвести $X_{\text{нов}}^T$;
- время вычислений t .

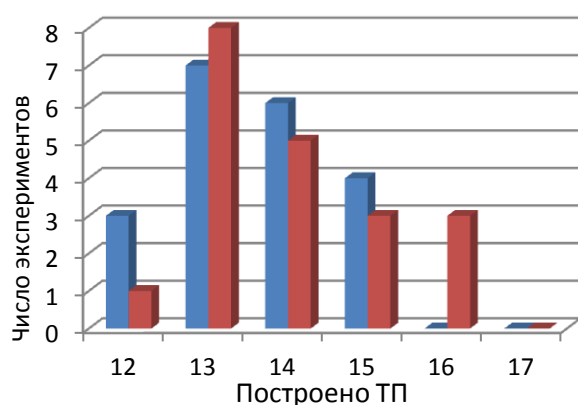
В таблицах 3, 4 и на рис. 8 приведены некоторые результаты исследования.

Таблица 3. Среднее число построенных ТП $X_{\text{нов}}^T$

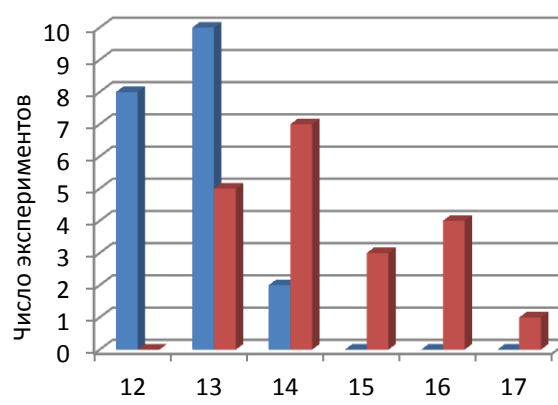
Карта	Среднее число построенных ТП $X_{\text{нов}}^T$, шт. (20 экспериментов)		
	Эвристический алгоритм	Алгоритм, реализующий метод раздельной кластеризации	Алгоритм, на основе метода k -средних
1	13,6	16,0	14,0
2	12,7	16,0	14,5
3	12,8	16,0	14,5
4	13,3	16,0	13,9
5	12,9	16,0	14,2
Среднее по 5 картам	13,1	16,0	14,2

Таблица 4. Среднее время выполнения программы $\tilde{t}$

Карта	Среднее время работы алгоритма $\tilde{t}$, мс (20 экспериментов)		
	Эвристический алгоритм	Алгоритм, реализующий метод раздельной кластеризации	Алгоритм, на основе метода k -средних
1	86,1	250,0	205,4
2	76,5	234,0	230,4
3	81,2	234,0	231,4
4	80,1	244,0	206,2
5	83,9	250,0	221,0
Среднее по 5 картам	81,6	240,8	218,9



а) Карта 1



б) Карта 2

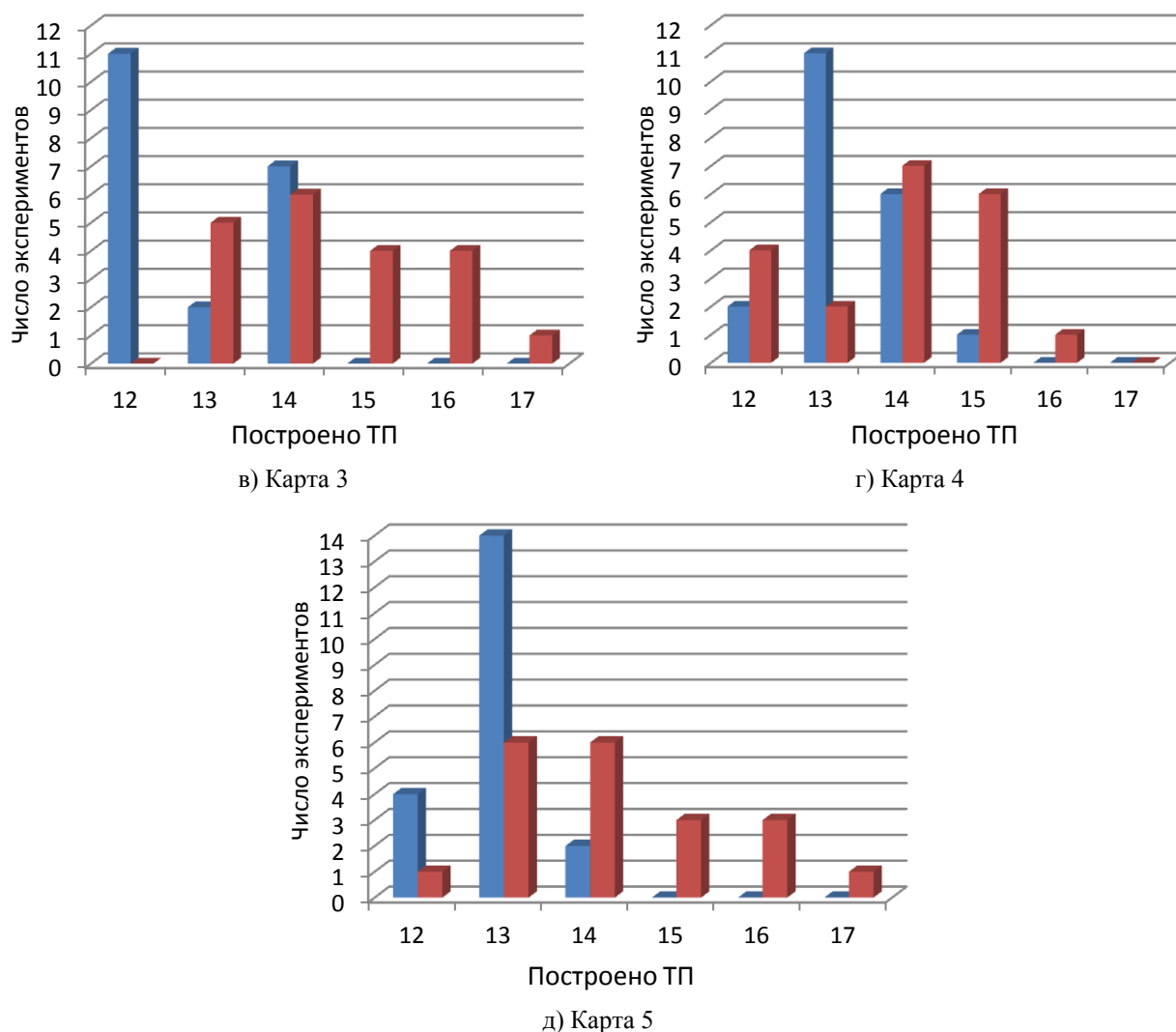


Рис. 8. Результат расчета тестовых примеров эвристическим алгоритмом и алгоритмом k -средних: ■ – эвристический алгоритм; ■ – алгоритм, реализующий метод k -средних

Анализ результатов, представленных на рис. 7, показывает, что среднее время решение задачи $\tilde{t}$ алгоритмом k -средних и разделительной кластеризации более чем в два раза превышает время решения задачи эвристическим алгоритмом. При этом среднее число $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$ построенных ТП при решении задачи эвристическим алгоритмом на 10% меньше, чем при решении алгоритмом, реализующим метод k -средних, и на 20% меньше, чем при решении задачи алгоритмом разделительной кластеризации.

Наилучший результат по первому индикатору для каждой из карт ($X_{\text{нов}}^T = 12$) достигнут при решении задачи эвристическим алгоритмом и алгоритмом, реализующим метод k -средних. Этот результат достигался при решении задачи эвристическим алгоритмом в пять раз чаще, чем алгоритмом, реализующим метод k -средних. Наихудший результат по

первому индикатору ($X_{\text{нов}}^T = 17$) получен при решении задачи методом k -средних, данный результат был получен дважды.

Графики зависимостей среднего времени вычислений $\tilde{t}$ и среднего числа построенных объектов $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$ от числа подключаемых к сети потребителей для эвристического алгоритма, алгоритма, реализующего метод разделительной кластеризации и алгоритма, построенного на основе метода k -средних, приведены в таблицах 5, 6 и на рис. 9. Средние значения индикаторов $X_{\text{нов}}^T$ и t рассчитаны на основании 5 экспериментов на карте каждого типоразмера; число мест возможно строительства подстанций для каждой карты совпадает с числом подключаемых потребителей.

Таблица 5. Среднее число построенных ТП $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$

Число потребителей на карте	Среднее число построенных ТП $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$, шт.		
	Эвристический алгоритм	Алгоритм, реализующий метод разделительной кластеризации	Алгоритм, на основе метода k -средних
100	13,1	16,0	14,2
200	25,3	32,0	31,4
300	39,1	40,0	46,3
500	60,0	66,0	68,0
1000	122,9	120,0	188,0

Таблица 6. Среднее время выполнения программы $\tilde{t}$

Число потребителей на карте	Среднее время работы алгоритмов $\tilde{t}$, мс		
	Эвристический алгоритм	Алгоритм, реализующий метод разделительной кластеризации	Алгоритм, на основе метода k -средних
100	81,6	236,4	218,4
200	184,5	781,0	1203,4
300	276,4	1734,1	2922,0
500	640,7	8063,9	7114,7
1000	1625,0	36700,0	21828,0

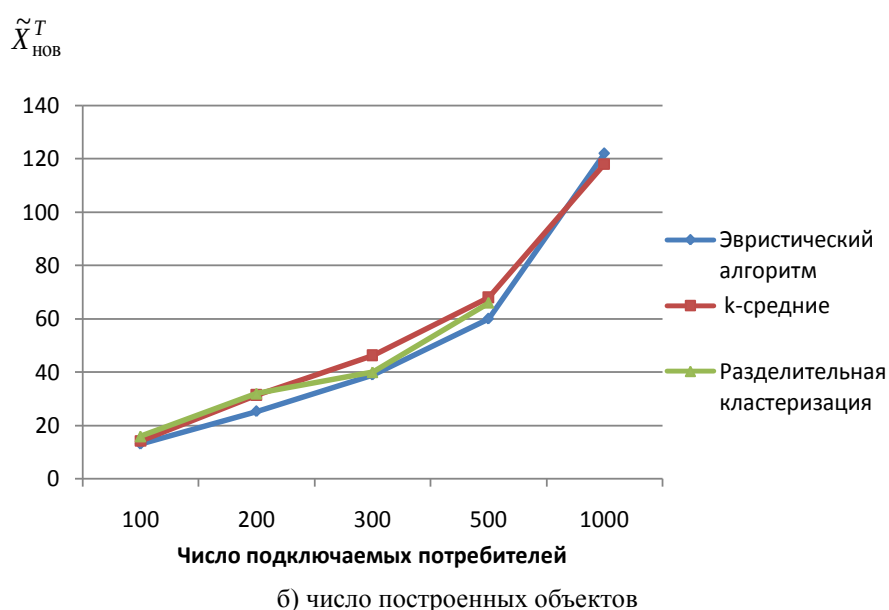
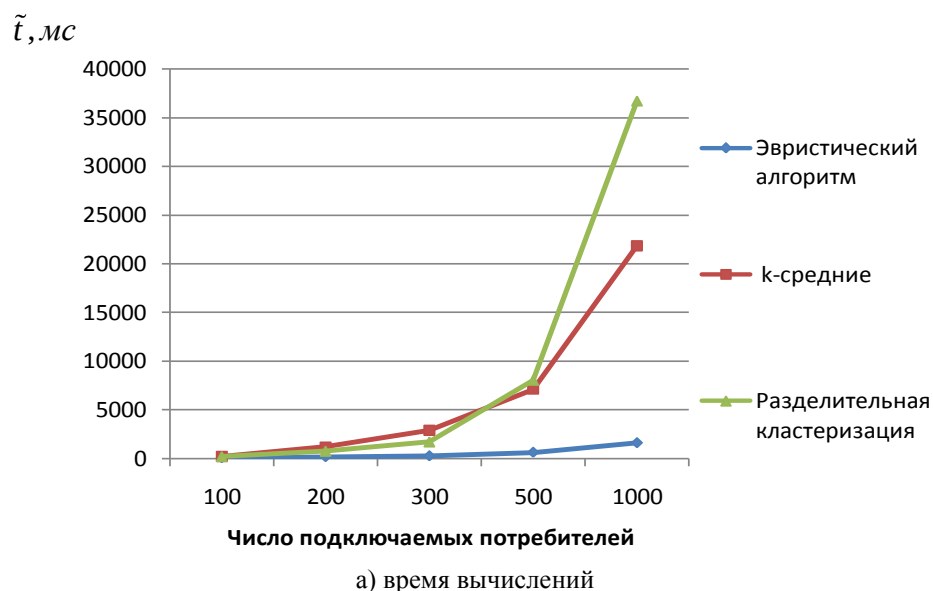


Рис. 9. Зависимости среднего времени вычислений $\tilde{t}$ и среднего числа построенных объектов $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$ от числа подключаемых потребителей

На основании данных, представленных на рис. 8, можно сделать вывод о значительном росте времени t алгоритмов на основе метода k -средних и разделительной кластеризации с ростом числа подключаемых потребителей. При этом все алгоритмы показывают приблизительно одинаковое значение первого индикатора – числа построенных ТП $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$.

Заключение

В статье представлены три алгоритма решения задачи определения числа и мест строительства новых подстанций: эвристический алгоритм; алгоритм, реализующий метод k -средних; алгоритм, реализующий метод разделительной кластеризации. Выполненный сравнительный анализ эффективности алгоритмов показал целесообразность применения

эвристического алгоритма при решении задачи высокой размерности. Алгоритм, реализующий метод k -средних, и алгоритм разделительной кластеризации могут быть применены лишь для решения задач невысокой размерности ввиду значительного роста времени вычислений с увеличением числа подключаемых потребителей.

Список литературы

1. Ананичева С.С., Калинкина М.А. Практические задачи электрических сетей: учеб. пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 112 с.
2. Булатов Б.Г. САПР и модели оптимального развития энергосистем: конспект лекций. Челябинск: ЮУрГУ, 2005. 69 с.
3. Арзамасцев Д.А., Липес А.В., Мызин А.Л. Модели оптимизации развития энергосистем. М.: Высшая школа, 1987. 272 с.
4. Карпенко А.П., Кузьмина И.А. Математическая модель распределительной городской сети энергоснабжения с учетом ее перспективного развития // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. С. 162-180. DOI: [10.7463/0514.0709781](https://doi.org/10.7463/0514.0709781)
5. Карпенко А.П., Кузьмина И.А. Методы решения задачи перспективного развития распределительной городской сети электроснабжения // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 10. С. 292-307. DOI: [10.7463/1014.0727891](https://doi.org/10.7463/1014.0727891)
6. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Интермент Инжиниринг, 2006. 670 с.
7. Керного В.В., Поспелов Г.Е., Федин В.Т. Местные электрические сети. Минск: Высшая школа, 1972. 218 с.
8. Коновалов Ю.С., Свеженцева О.В. Размещение источников электрической мощности в системах электроснабжения // Региональная научно-техническая конференция «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири»: тез. докл. Иркутск: ИЛИ, 1990. С. 21-23.
9. Thompson G.L. A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Locations // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1981. Vol. PAS-100, no. 5. P. 2683-2687. DOI: [10.1109/TPAS.1981.316784](https://doi.org/10.1109/TPAS.1981.316784)
10. Gonen T. Review of distribution system planning models: A model for optimal multistage planning // IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution. 1986. Vol. 133, no. 7. P. 397-408. DOI: [10.1049/ip-c:19860060](https://doi.org/10.1049/ip-c:19860060)
11. Gonen T. Distribution system planning using mixed integer programming // IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution. 1981. Vol. 128, no. 2. P. 70-79. DOI: [10.1049/ip-c:19810010](https://doi.org/10.1049/ip-c:19810010)
12. Ramirez-Rosado I. J. Pseudodynamic planning for expansion of power distribution systems // IEEE Transactions on Power Systems. 1991. Vol. 6, no. 1. P. 245-254. DOI: [10.1109/59.131069](https://doi.org/10.1109/59.131069)

13. Diaz-Dorado E., Cidras E. J., Miguez E. Application of evolutionary algorithms for the planning of urban distribution networks of medium voltage // IEEE Transactions on Power Systems. 2002. Vol. 17, no. 3. P. 879-883. DOI: [10.1109/TPWRS.2002.800975](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.800975)
14. Diaz-Dorado E., Cidras E. J., Miguez E. Planning of large rural low voltage networks using evolution strategies // IEEE Transactions on Power Systems. 2003. Vol. 18, no. 4. P. 1594-1600. DOI: [10.1109/TPWRS.2003.818741](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.818741)

Determining the Number and Sites for New Substations in Terms of Perspective Development of Urban Power Distribution Networks

A.P. Karpenko¹, I.A. Kuzmina^{1,*}

[*kuzminainna@yandex.ru](mailto:kuzminainna@yandex.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: urban power distribution network, construction of substations, separation clustering, k-means method

This article continues a cycle of A. P Karpenko's and I. A Kuzmina's papers regarding the problem of perspective development of distribution power supply network (the magazine "Science and education" No. 05, May 2014 [<http://technomag.bmstu.ru/doc/709781.html>], No. 10, October 2014 [<http://technomag.bmstu.ru/doc/727891.html>]).

The article sets a mathematical problem of defining the optimum number and sites to construct new transformer and distribution substations as an optimizing problem of discrete programming.

Three algorithms to solve this problem are proposed:

1. algorithm realizing k-means method;
2. algorithm based on separation clustering method;
3. heuristic algorithm.

The first developed algorithm realizes a k-means method, which is a popular non-hierarchical clustering one. The method allows us to separate a set of objects into the clusters containing objects being at the smallest distance from the centres of clusters, which are accepted to be the sites for new substations.

The algorithm based on the method of separation clustering (a hierarchical clustering method) realizes consecutive separation of clusters into two parts. Separation of clusters is made before fulfilling a condition for a possibility to construct the substation capable to connect all consumers-members of cluster.

The heuristic algorithm realizes consecutive arrangement of sites to construct new substations. Thus each step makes attempt to find such a site for new substation that allows a possibility to connect the maximum number of consumers.

The article presents a comparative analysis of the algorithms efficiency on the maps of various dimensions using two indicators: the number of constructed substations and computational time.

The analysis showed high computing consumption when using the algorithm realizing a separation clustering method and the k-means method-based algorithm. Thus the algorithm based on a method of k-means and heuristic algorithm showed better results in terms of the number of constructed substations, than the algorithm implementing the separation clustering method

References

1. Ananicheva S.S., Kalinkina M.A. *Prakticheskie zadachi elektricheskikh setey* [Practical tasks of electrical networks]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2012. 112 p. (in Russian).
2. Bulatov B.G. *SAPR i modeli optimal'nogo razvitiya energosistem* [CAD and model of the optimal development of power systems]. Chelyabinsk, YuUrSU Publ., 2005. 69 p. (in Russian).
3. Arzamastsev D.A., Lipets A.V., Myzin A.L. *Modeli optimizatsii razvitiya energosistem* [Models of optimization of development of power systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 272 p. (in Russian).
4. Karpenko A.P., Kuz'mina I.A. A mathematical model of urban distribution electro-network considering its future development. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 5, pp. 162-180. DOI: [10.7463/0514.0709781](https://doi.org/10.7463/0514.0709781) (in Russian).
5. Karpenko A.P., Kuz'mina I.A. Problem-Solving Methods for the Prospective Development of Urban Power Distribution Network. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 10, pp. 292-307. DOI: [10.7463/1014.0727891](https://doi.org/10.7463/1014.0727891) (in Russian).
6. Kudrin B.I. *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatiy* [Power supply of industrial enterprises]. Moscow, Interment Inzhiniring Publ., 2006. 670 p. (in Russian).
7. Kernogo V.V., Pospelov G.E., Fedin V.T. *Mestnye elektricheskie seti* [Local electrical networks]. Minsk, Vysheyskaya shkola Publ., 1972. 218 p. (in Russian).
8. Konovalov Yu.S., Svezhentseva O.V. Placement of sources of electric power in electric power supply systems. *Regional'naya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri": tez. dokl.* [Abstr. of Regional scientific-technical conference "Improving efficiency of production and use of energy in Siberia"]. Irkutsk, ILI Publ., 1990, pp. 21-23. (in Russian).
9. Thompson G.L. A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Locations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, vol. PAS-100, no. 5, pp. 2683-2687. DOI: [10.1109/TPAS.1981.316784](https://doi.org/10.1109/TPAS.1981.316784)
10. Gonen T. Review of distribution system planning models: A model for optimal multistage planning. *IEEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, 1986, vol. 133, no. 7, pp. 397-408. DOI: [10.1049/ip-c:19860060](https://doi.org/10.1049/ip-c:19860060)

11. Gonen T. Distribution system planning using mixed integer programming. *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, 1981, vol. 128, no. 2, pp. 70-79. DOI: [10.1049/ip-c:19810010](https://doi.org/10.1049/ip-c:19810010)
12. Ramirez-Rosado I. J. Pseudodynamic planning for expansion of power distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1991, vol. 6, no. 1, pp. 245-254. DOI: [10.1109/59.131069](https://doi.org/10.1109/59.131069)
13. Diaz-Dorado E., Cidras E. J., Miguez E. Application of evolutionary algorithms for the planning of urban distribution networks of medium voltage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, vol. 17, no. 3, pp. 879-883. DOI: [10.1109/TPWRS.2002.800975](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.800975)
14. Diaz-Dorado E., Cidras E. J., Miguez E. Planning of large rural low voltage networks using evolution strategies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, vol. 18, no. 4, pp. 1594-1600. DOI: [10.1109/TPWRS.2003.818741](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.818741)