УДК 621.311.003.11

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ

В. В. КРОТЕНОК, Ю. В. РАБСКАЯ
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

При проектировании городских электрических сетей возникает задача планирования и размещения объектов электроснабжения – кабельных и воздушных линий, трансформаторных и силовых подстанций и т. п. Электроснабжение всех объектов, с одной стороны, должно быть достаточно по мощности и удовлетворять требованиям надежности питания потребителей различных категорий, а с другой стороны, должно быть экономически целесообразно организовано.

Вопрос о выборе места фактического размещения понижающей трансформаторной подстанции (ПТП) в нормативных документах [1]–[3] не рассматривается и не регламентируется, поскольку отсутствует практическая методика технико-экономического обоснования выбора места для размещения ПТП. Поэтому задача оптимального размещения ПТП на стадии проектирования является актуальной.

Критерием для выбора местоположения ПТП можно принять функцию оптимизации (1):

$$F(x, y) = x + y\,; \quad F(x, y) \to \min\,, \tag{1}$$

где x – затраты на сооружение сети, р.; y – затраты на потери, р.

Затраты на сооружение определяют: место расположения подстанции, которое включает в себя длину кабельных или воздушных линий и их сечение, мощность понижающего трансформатора, график нагрузки и параметры сети.

Потери энергии зависят от графика нагрузки потребителей, типа трансформатора, длин проводников и их сечений. Выбор сечения проводников по критерию экономической плотности тока в общем случае не отвечает минимуму затрат и требует более точного экономического обоснования. Таким образом, значение функции затрат зависит от составляющих, обуславливающих затраты на сооружение подстанции и потери энергии.

Одним из вариантов решения поставленной задачи является размещение ПТП в центре электрических нагрузок, являющегося по своей сути аналогом центра масс [4], [5]. Однако такое решение является оптимальным только для случая однотипности потребителей по графику нагрузки. В общем случае это решение не обеспечивает оптимальности. Аналитическое решение рассматриваемого вопроса является сложной задачей из-за нерегулярной нагрузки потребителей, изменяющейся во времени. Наличие сложных функциональных зависимостей и множественность параметров делает поиск решения практически невозможным.

Выбор местоположения, типа, мощности и других параметров понижающей трансформаторной подстанции в основном обуславливается величиной и характером электрических нагрузок и размещением их на генплане и в производственных, архитектурно-строительных и эксплуатационных требованиях. Важно, чтобы ПТП располагалась как можно ближе к центру питаемых от нее нагрузок. Намеченное место расположения уточняется по условиям планировки предприятия, ориентировочным габаритам и типу (отдельно стоящая, пристроенная, внутренняя, закрытая, комплектная) подстанции.

На практике наиболее распространенными методами выбора места расположения подстанции являются методы медиан и центра масс (центр тяжести) [1], [2], [5], [8] основанные на методах, используемых в математике, механике и физике.

Метод медиан

Нагрузки представляют собой совокупность точек лежащих на плоскости. Метод медиан заключается в разбиении этих точек на тройки (вершины треугольника) и нахождении в каждом таком треугольнике точки пересечения медиан. Затем полученные точки пересечения медиан опять выбираются в качестве вершин треугольников и находятся точки пересечения медиан. Это продолжается до тех пор, пока не получится единственная точка, которая и будет, согласно этому методу, оптимальным положением подстанции. Метод предусматривает количество нагрузок 3^k, где k – любое целое число.

Медианы в рассматриваемом треугольнике задаются уравнением прямой, определяемой по выражению

$$kx + b = y. \qquad (2)$$

Точка их пересечения определяется решением системы уравнений:

$$\begin{cases} k_1 x + b_1 = y; \\ k_2 x + b_2 = y. \end{cases} \qquad (3)$$

Суммарное расстояние от точки расположения подстанции до нагрузок будет определяться по формуле

$$S = \sum_{i=1}^{k} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, \qquad (4)$$

где k – количество нагрузок, $(x_i; y_i)$ – координаты i-й нагрузки; $(x; y)$ – координаты подстанции.

Математическую модель метода медиан реализуется с помощью математического пакета MathCAD.

Ввод координат нагрузок осуществляется в два массива X_S и Y_S, для координат X и Y соответственно. Количество элементов в каждом массиве соответствует числу нагрузок k.

Далее, с помощью программного фрагмента описывается следующий алгоритм решения задачи:

а) проверка: лежат ли все точки на одной прямой:

– матричным способом решается система уравнений (3);

– по первым двум точкам $(x_1; y_1); (x_2; y_2)$ составляется уравнение проходящей через них прямой (т. е. определяются коэффициенты k и b);

– при помощи цикла рассматривается принадлежность каждой точки $(x_i; y_i)$ этой прямой. Если она принадлежит ей, то к вспомогательной переменной q прибавляется единица ($q = q + 1$);

– проверка, лежат ли все точки на одной прямой: значение переменной q должно быть равно k – количеству нагрузок. Если да, то прерывается выполнение дальнейшего программного фрагмента, если нет, то продолжается поиск координаты подстанции;

б) нахождение координат оптимального расположения подстанции:

– количество шагов цикла, за которое определяются конечные координаты, равно $\log_3 k$;

– количество рассматриваемых точек в массивах в зависимости от номера шага равно $k/3^{n-1}$;

– определяются координаты середин двух сторон треугольника;

– после решения системы уравнений (3) находится точка пересечения прямых, представляющих собой медианы рассматриваемого треугольника;

– сохраняется значение координат точки пересечения в том же массиве;

– по окончанию цикла в матрицу RM записываются координаты расположения подстанции;

в) по формуле (4) определяется суммарное расстояние от подстанции до нагрузок.

Листинг программного фрагмента определения координат расположения ПТП в MathCAD представлен на рис. 1.

Исходные данные

Количество нагрузок

$k := 3$

Координаты расположения нагрузок

$s := 1..k$ $\qquad$ $ORIGIN := 1$

$X_s := \begin{array}{|c|}\hline 1 \\ \hline 3 \\ \hline 3 \\ \hline \end{array}$ $\qquad$ $Y_s := \begin{array}{|c|}\hline 1 \\ \hline 1 \\ \hline 3 \\ \hline \end{array}$

$x_s := X_s$ $\qquad$ $y_s := Y_s$

Рис. 1. Листинг программы MathCAD (метод медиан) (окончание см. на с. 52)

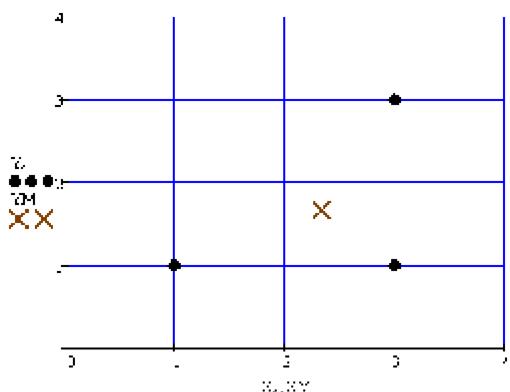
```
RM:= | A1 ← ( x_1  1 )
     |       ( x_2  1 )
     | V1 ← ( y_1 )
     |       ( y_2 )
     | R1 ← lsolve(A1, V1)
     | k1 ← R1_1
     | b1 ← R1_2
     | q ← 2
     | i ← 3
     | while (q < k) ∧ (i ≤ k)
     |   | q ← q + 1  if k1·x_i + b1 = y_i
     |   | i ← i + 1
     | if q = k
     |   | return "Все точки лежат на одной прямс
     |   | break
     | for n ∈ 1.. log(k, 3)                      otherwise
     |   | i ← 1
     |   | while i ≤ 3
     |   |   | xm1 ← (x_i + x_{i+2}) / 2
     |   |   | ym1 ← (y_i + y_{i+2}) / 2
     |   |   | xm2 ← (x_{i+1} + x_{i+2}) / 2
     |   |   | ym2 ← (y_{i+1} + y_{i+2}) / 2
     |   |   | A1 ← ( x_{i+1}  1 )
     |   |   |       ( xm1     1 )
     |   |   | V1 ← ( y_{i+1} )
     |   |   |       ( ym1     )
     |   |   | R1 ← lsolve(A1, V1)
     |   |   | k1 ← R1_1
     |   |   | b1 ← R1_2
     |   |   | A2 ← ( x_i  1 )
     |   |   |       ( xm2  1 )
     |   |   | V2 ← ( y_i )
     |   |   |       ( ym2 )
     |   |   | R2 ← lsolve(A2, V2)
     |   |   | k2 ← R2_1
     |   |   | b2 ← R2_2
     |   |   | AM ← ( k1  −1 )
     |   |   |       ( k2  −1 )
     |   |   | VM ← ( −b1 )
     |   |   |       ( −b2 )
     |   |   | RM ← lsolve(AM, VM)
     |   |   | x_{(i+2)/3} ← RM_1
     |   |   | y_{(i+2)/3} ← RM_2
     |   |   | i ← i + 3
     |   | RM ← ( x_1 )
     |   |       ( y_1 )
```

$RM = \begin{pmatrix} [illegible] \\ 1.525 \end{pmatrix}$ $XM := RM_1$ $YM := RM_2$

Полученные координаты центра:

$XM = [illegible]$ $YM = [illegible]$

Относительное расположение нагрузок и подстанции



Определяем суммарное расстояние от центров до рассредоточенных нагрузок:

$$S := \sum_{s=1}^{k} \sqrt{(x_s - XM)^2 + (y_s - YM)^2} \qquad S_1 = [illegible]$$

Рис. 1. Окончание (начало см. на с. 51)

Метод центра масс

Центр масс – геометрическая точка, положение которой характеризует распределение масс в теле или механической системе.

Координаты центра масс определяются формулами:

$$x_c = \frac{\sum m_k x_k}{M};$$
$$y_c = \frac{\sum m_k y_k}{M};$$
$$z_c = \frac{\sum m_k z_k}{M}. \qquad (5)$$

Для простоты расчетов принимается мощность нагрузок одинаковая во всех точках, равная 1 о. е. Тогда координаты ПТП определяются по выражениям:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^{k} x_i}{k}; \; y_c = \frac{\sum_{i=1}^{k} y_i}{k}, \qquad (6)$$

где k – количество нагрузок; $(x_i; y_i)$ – координаты i-й нагрузки; $(x_c; y_c)$ – координаты подстанции.

По формуле (6) определяются координаты центра масс (*XM*; *YM*).

На плоскости отображаются нагрузки в виде точек с соответствующими координатами и полученные координаты подстанции.

По формуле (4) определяется суммарное расстояние от подстанции до нагрузок. Листинг программного фрагмента определения координат расположения ПТП в MathCAD (метод центра масс) представлен на рис. 2.

Исходные данные

Колличество нагрузок

$k := 3$

Координаты расположения нагрузок

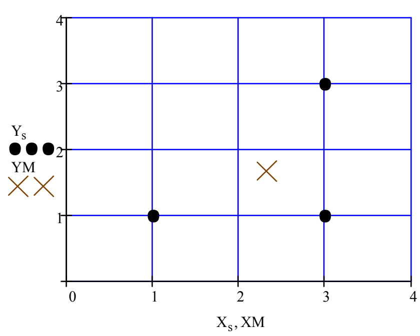
$s := 1..k$

$$XM := \frac{\sum_{n=1}^{k} X_n}{k} \qquad YM := \frac{\sum_{n=1}^{k} Y_n}{k}$$

Полученные координаты центра:

$XM = 2.333 \qquad YM = 1.667$

Относительное расположение нагрузок и подстанции



$$S_2 := \sum_{s=1}^{k} \sqrt{(X_s - XM)^2 + (Y_s - YM)^2}$$

$S_2 = 3.924$

Рис. 2. Листинг программы MathCAD (метод центра масс)

Метод итерационного решения систем (метод сопряженных градиентов)

Сущность метода состоит в следующем [6]:

– к искомому точному решению x^* системы $Ax = b$ строится последовательность приближенных решений $x0$, $x1$, …, xk, …;

– каждое очередное приближение дает оценку точного решения с все уменьшающейся погрешностью;

– оценка точного решения может быть получена с любой требуемой точностью.

Если матрица A симметричная и положительно определенная, то функция, определяемая выражением

$$q(x) = \frac{1}{2} x^T \cdot A \cdot x - x^T b + c, \qquad (7)$$

имеет единственный минимум, который достигается в точке x^*, совпадающей с решением системы уравнений.

Итерация метода сопряженных градиентов состоит в вычислении очередного приближения к точному решению выражения

$$x^k = x^{k-1} + s^k t^k, \qquad (8)$$

где x^k – очередное приближение; x^{k-1} – приближение, построенное на предыдущем шаге; s^k – скалярный шаг; t^k – вектор направления.

Далее приведен алгоритм сопряженных градиентов для минимизации функций общего вида [6], [7].

Шаг 1. Вычисление антиградиента в произвольной точке $x_{(0)}$:

$$d_{(0)} = -f'(x_{(0)}).$$

Шаг 2. Вычисление вектора направления:

$$t^k = -d^k + \frac{((d^k)^T, d^k)}{((d^{k-1})^T, d^{k-1})} t^{k-1}.$$

Шаг 3. Вычисление величины смещения по выбранному направлению:

$$s^k = \frac{(t^k, d^k)}{((t^k)^T \cdot A \cdot t^k)}.$$

Шаг 4. Вычисление нового приближения:

$$x^k = x^{k-1} + s^k t^k.$$

Результаты вычислений поиска минимума целевой функции (4) (координат расположения ПТП) методом сопряженных градиентов показывают, что расположение ПТП дает меньшую сумму длин кабельных линий от ПТП до нагрузок. На рис. 3 представлен листинг программы MathCAD, где реализовано решение задачи методом сопряженных градиентов и отображен график расположения ПТП по результатам расчетов методов центра масс и поиска минимума целевой функции.

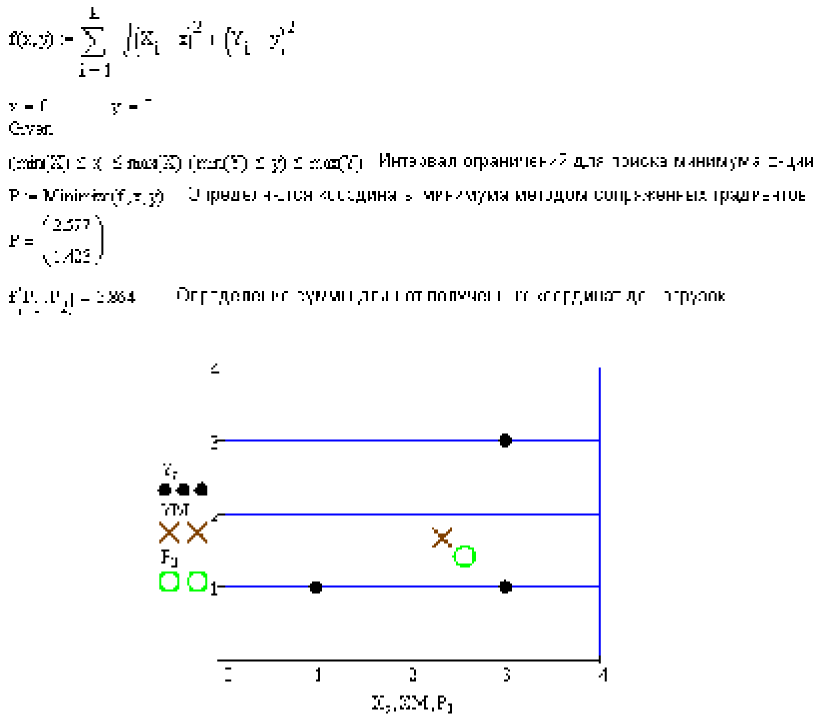


Рис. 3. Листинг программы MathCAD (метод сопряженных градиентов)

Заключение

1. Решение задачи минимизации затрат является актуальным, позволяющим проектировать более экономичные сети.

2. Размещение ПТП в центре электрических нагрузок не обеспечивает минимум затрат.

3. Метод медиан и центра масс для нахождения координат ПТП дают одинаковые результаты. При координатах трех нагрузок {1;1 3;1 3;3} координаты ПТП {2,333; 1,667}, а сумма длин кабельных линий 3,924.

4. Использование методов оптимизации для поиска координат ПТП оказалось целесообразным. При тех же условиях найденные координаты ПТП методом сопряженных градиентов {2,557; 1,423}, а сумма длин кабельных линий 3,864. Эффект от применения метода сопряженных градиентов составил 1,53 %.

Литература

1. РД 34.20.185–94. Инструкция по проектированию городских электрических сетей / МТЭ Рос. Федерации, РАО ЕЭС Рос. Федерации. – М., 1994.
2. СН 541–82. Инструкция по проектированию наружного освещения городов, поселков и сельских населенных пунктов / Госгражданстрой. – М., 1982.
3. СНиП 2.07.01–89. Строительные нормы и правила. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений / Госкомархитектуры. – М., 1989.
4. Гринкруг, М. С. Задача проектирования системы электроснабжения на основе минимизации приведенных затрат / М. С. Гринкруг, С. А. Гордин // Двенадцатая всерос. науч.-техн. конф. «Энергетика, экология, надежность, безопасность». – Томск, 2006.
5. Местоположение и размещение подстанций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2001/eltf/dey/ellib /ct2.htm.
6. Branch, M. A., T. F. Coleman, and Y. Li, "A Subspace, Interior, and Conjugate Gradient Method for Large-Scale Bound-Constrained Minimization Problems,"SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 21, Number 1, pp. 1–23, 1999.

7. Sorensen, D. C., "Minimization of a Large Scale Quadratic Function Subject to an Ellipsoidal Constraint," Department of Computational and Applied Mathematics, Rice University, Technical Report TR94-27, 1994.

8. Липкин, Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Б. Ю. Липкин. – М. : Высш. шк., 1990.

Получено 30.03.2011 г.