

В.В. КРОТЕНОК, к.т.н., доцент кафедры

«Информационные технологии»,

Ю.В. РАВСКАЯ, студентка,

УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»

Технико-экономическое обоснование выбора места расположения подстанции

При проектировании городских электрических сетей возникает задача планирования и размещения объектов электрооборудования — кабельных и воздушных линий, трансформаторных и силовых подстанций и т.п. Электрооборудование 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], [2], [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:

$$F(x, y) = x + y; F(x, y) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где x — затраты на сооружение сети, руб.;

y — затраты на потери, руб.

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, являющемся 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 делают 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:

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

Точка их пересечения определяется решением системы уравнений:

$$\begin{cases} k_1x + b_1 = y \\ k_2x + b_2 = y. \end{cases} \quad (3)$$

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

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

где k — количество нагрузок;

$(x_i; y_i)$ — координаты i -той нагрузки;

$(x; y)$ — координаты подстанции.

Математическая 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.

```

Исходные данные
Количество нагрузок
k := 3
Координаты расположения нагрузок
 $\bar{x}_k := 1..k$ 
 $X_s := \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$ 
 $Y_s := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix}$ 
 $x_s := X_s$ 
 $y_s := Y_s$ 
ORIGIN:=1
for n in 1..log(k,3)
  i ← 1
  while i ≤ 3
    xm1 ←  $\frac{x_i + x_{i+2}}{2}$ 
    ym1 ←  $\frac{y_i + y_{i+2}}{2}$ 
    xm2 ←  $\frac{x_{i+1} + x_{i+2}}{2}$ 
    ym2 ←  $\frac{y_{i+1} + y_{i+2}}{2}$ 
    A1 ←  $\begin{pmatrix} x_{i+1} & 1 \\ xm1 & 1 \end{pmatrix}$ 
    V1 ←  $\begin{pmatrix} y_{i+1} \\ ym1 \end{pmatrix}$ 
    R1 ← solve(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 прямой»
      break
    AM ←  $\begin{pmatrix} k1 & -1 \\ k2 & -1 \end{pmatrix}$ 
    VM ←  $\begin{pmatrix} -b1 \\ -b2 \end{pmatrix}$ 
    RM ← solve(AM, VM)
     $\frac{x_{i+2}}{3} ← RM_1$ 
     $\frac{y_{i+2}}{3} ← RM_2$ 
    i ← i + 3
  end while
  RM ←  $\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$ 

```

Рис. 1. Листинг программы MathCAD (метод медиан)

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 окончании 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 рисунках 1–2.

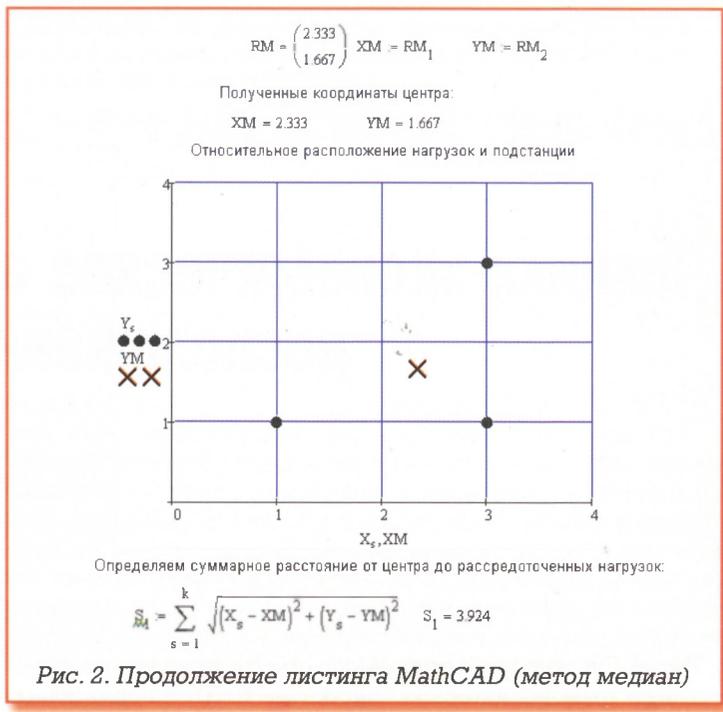


Рис. 2. Продолжение листинга MathCAD (метод медиан)

Метод центра масс

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

Координаты центра масс определяются формулами:

$$x_c = \frac{\sum m_k x_k}{M};$$

$$y_c = \frac{\sum m_k y_k}{M};$$

$$z_c = \frac{\sum m_k z_k}{M}.$$

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

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k}, \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{k},$$

где k — количество нагрузок,
 $(x_i; y_i)$ — координаты i -той 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 рисунке 3.

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 $x_0, x_1, \dots, x_k, \dots$;
- каждое очередное приближение дает оценку точного решения с все уменьшающейся погрешностью;

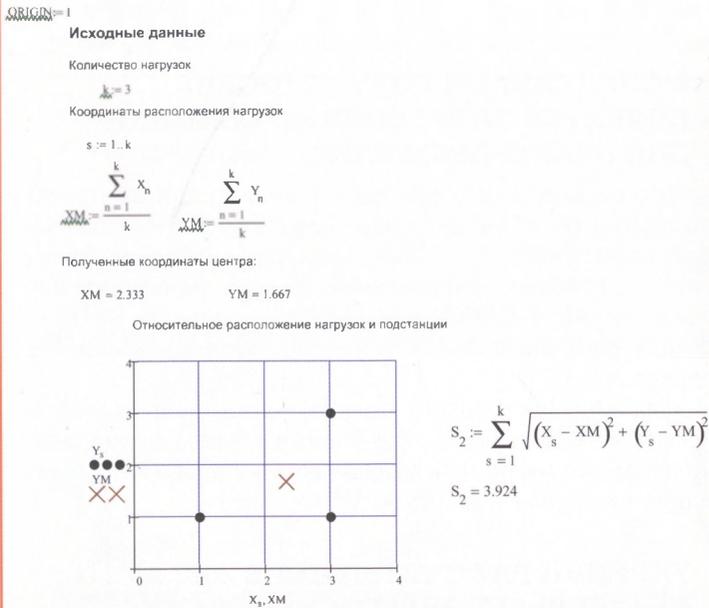


Рис. 3. Листинг программы MathCAD (метод центра масс)

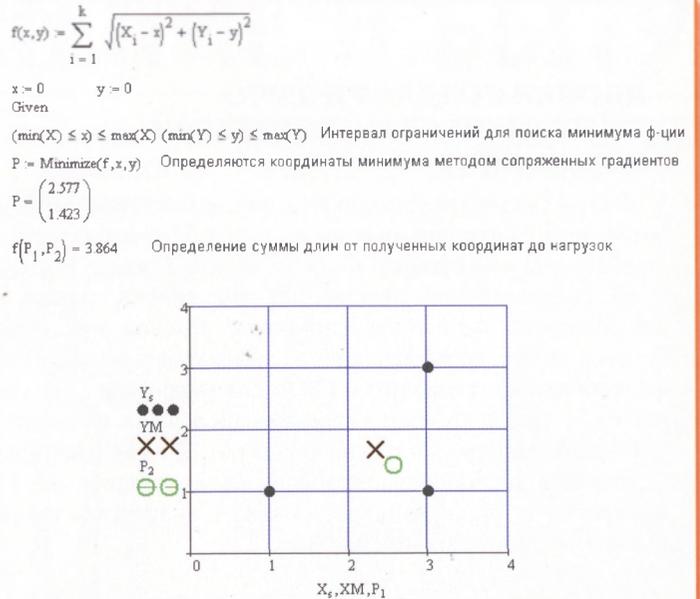


Рис. 4. Листинг программы MathCAD (метод сопряженных градиентов)

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

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

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

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:

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

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 рисунке 4

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.

Выводы

- Решение задачи минимизации затрат является актуальным, позволяющим проектировать более экономичные сети.
- Размещение ПТП в центре электрических нагрузок не обеспечивает минимум затрат.
- 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.
- 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 РФ, РАО ЕЭС России, 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 всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика, экология, надежность, безопасность». Томск, 2006 г.
5. Местоположение и размещение подстанций [Электронный ресурс] Ресурс доступа <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2001/eltf/dey/ellib/ct2.htm> Год посещения 2011.
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.