

## ОПТИМАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПИТАЮЩЕЙ ЛИНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Г. Х. ПОБУЛЬ,

кандидат технических наук

Электрическая сеть является основным потребителем металла в сельскохозяйственных электроустановках, причем расход проводникового материала в электрических сетях составляет 75—90% от общего его расхода в системе. Из общих капитальных затрат по электротехнической части 50—60% падает на сооружение сетей; значительную долю при этом составляют затраты на высоковольтную распределительную сеть. Ввиду больших объемов строительства, даже относительно небольшое сокращение затрат на сооружение и эксплуатацию сетей приводит в конечном счете к значительной экономии. Поэтому необходимо использовать все возможности для снижения расхода металла и удешевления сельскохозяйственных сетей высокого напряжения, учитывая при этом также и требования эксплуатационного характера.

В направлении облегчения и удешевления сельскохозяйственных электрических сетей проведено уже значительное количество работ, в которых рассматриваются вопросы выбора параметров и методы расчета сети (например, на минимальный расход металла и т. п.). Все эти исследования обычно велись без учета влияния конфигурации сети на ее технико-экономические показатели. До настоящего времени вопросы выбора конфигурации сельскохозяйственной электрической сети не получили надлежащей разработки.

Отсутствие обоснованных рекомендаций по выбору конфигурации высоковольтной распределительной сети привело к тому, что в проектной практике имеют место значительные отступления от оптимальных решений, а это приводит к перерасходу денежных средств и материалов.

На основе обобщения результатов, полученных в смежных областях науки по вопросам определения наивыгоднейшего места своза грузов, по трассированию железных дорог, водопроводных, оросительных, тепловых и электрических сетей и т. п. (1-7), в настоящей работе даются постановка и решение вопроса о выборе конфигурации сетей в общем виде с дальнейшим развитием ее для условий, соответствующих сельскохозяйственным электрическим сетям. Рассматриваются и вопросы определения конфигурации сельскохозяйственных сетей, обеспечивающей оптимальные технико-экономические показатели, с учетом местных обстоятельств, ограничивающих выбор конфигурации.

Предположим сначала, что при проектировании сети все ограничивающие условия в выборе трассы электролиний отсутствуют и что нами определены потребители, которые подлежат присоединению к одной питающей линии, идущей от питающей подстанции.

Общее аналитическое условие для нахождения оптимального способа соединения  $n$  точек выражается следующей формулой:

$$V = k_1 L_1 + k_2 L_2 + \dots + k_n' L_n' = \text{мин}, \quad (1)$$

где  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n'$  — коэффициенты, характеризующие сечения, потери, расходы и т. д., рассчитанные на единицу длины сети;

$L_1, L_2, L_3, \dots, L_n'$  — длины участков сети, а  $n'$  — число участков.

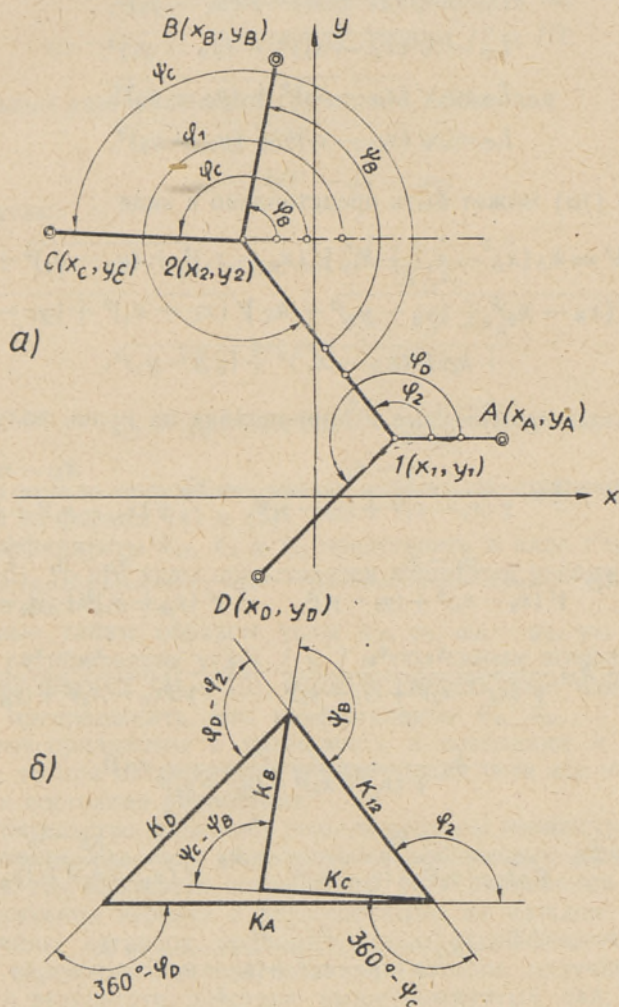


Рис. 1. Графоаналитическое определение месторасположения узлов в сети.

Предположим, что мы имеем четыре произвольно расположенные точки, которые следует соединить между собой одной питающей линией, как это показано на рис. 1а. Методику и выводы, относящиеся к случаю соединения электрической сетью четырех точек, можно легко распростра-

нить на соединении между собой любого количества точек, учитывая при этом любые ограничивающие условия, связанные с топографией трассы.

При четырех точках будем иметь согласно уравнению (1)

$$V = k_A L_A + k_{12} L_{12} + k_B L_B + k_C L_C + k_D L_D. \quad (1a)$$

Выберем направление координатной оси  $X$  так, чтобы оно совпало с направлением первого участка сети  $A1$ . Тогда длину участков можно выразить через координаты точек следующим образом:

$$\begin{aligned} L_A &= x_A - x_1, \\ L_{21} &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \\ L_{12} &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \\ L_D &= \sqrt{(x_D - x_1)^2 + (y_D - y_1)^2}, \\ L_B &= \sqrt{(x_B - x_2)^2 + (y_B - y_2)^2}, \\ L_C &= \sqrt{(x_C - x_2)^2 + (y_C - y_2)^2}, \end{aligned}$$

и выражение (1a) может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} V &= k_A (x_A - x_1) + k_{12} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} + \\ &+ k_B \sqrt{(x_B - x_2)^2 + (y_B - y_2)^2} + k_C \sqrt{(x_C - x_2)^2 + (y_C - y_2)^2} + \\ &+ k_D \sqrt{(x_D - x_1)^2 + (y_D - y_1)^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Беря частные производные и приравнявая их нулю, получаем:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial x_1} &= -k_A - k_{12} \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} - k_D \frac{x_D - x_1}{\sqrt{(x_D - x_1)^2 + (y_D - y_1)^2}} = 0, \\ \frac{\partial V}{\partial y_1} &= -k_{12} \frac{y_2 - y_1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} - k_D \frac{y_D - y_1}{\sqrt{(x_D - x_1)^2 + (y_D - y_1)^2}} = 0, \quad (2) \\ \frac{\partial V}{\partial x_2} &= -k_{12} \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} - k_B \frac{x_B - x_2}{\sqrt{(x_B - x_2)^2 + (y_B - y_2)^2}} - \\ &- k_C \frac{x_C - x_2}{\sqrt{(x_C - x_2)^2 + (y_C - y_2)^2}} = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial y_2} &= -k_{12} \frac{y_1 - y_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} - k_B \frac{y_B - y_2}{\sqrt{(x_B - x_2)^2 + (y_B - y_2)^2}} - \\ &- k_C \frac{y_C - y_2}{\sqrt{(x_C - x_2)^2 + (y_C - y_2)^2}} = 0. \end{aligned} \right.$$

Равенства (2) могут быть выражены через соответствующие углы (рис. 1a) следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} k_A + k_{12} \cos \varphi_2 + k_D \cos \varphi_D &= 0 \\ k_{12} \sin \varphi_2 + k_D \sin \varphi_D &= 0 \\ k_{12} \cos \varphi_1 + k_B \cos \varphi_B + k_C \cos \varphi_C &= 0 \\ k_{12} \sin \varphi_1 + k_B \sin \varphi_B + k_C \sin \varphi_C &= 0. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Из двух первых уравнений (3) можно определить углы

$$\begin{aligned}\varphi_D &= \arccos \frac{k_{12}^2 - k_A^2 - k_D^2}{2k_A k_D}, \\ \varphi_2 &= \arccos \frac{k_D^2 - k_A^2 - k_{12}^2}{2k_A k_{12}}, \\ \varphi_D - \varphi_2 &= \arccos \frac{k_A^2 - k_D^2 - k_{12}^2}{2k_{12} k_D},\end{aligned}\quad (4)$$

где

$\varphi_D$  — угол между лучами  $1A$  и  $1D$ ,  
 $\varphi_2$  — угол между лучами  $1A$  и  $12$ ,  
 $\varphi_D - \varphi_2$  — угол между лучами  $12$  и  $1D$ .

Из остальных двух уравнений (3) можно, обозначая

$$\begin{aligned}\varphi_B + 360^\circ - \varphi_1 &= \psi_B, \\ \varphi_C + 360^\circ - \varphi_1 &= \psi_C,\end{aligned}$$

определить углы:

$$\begin{aligned}\psi_C &= \arccos \frac{k_B^2 - k_{12}^2 - k_C^2}{2k_{12} k_C}, \\ \psi_B &= \arccos \frac{k_C^2 - k_{12}^2 - k_B^2}{2k_{12} k_B}, \\ \psi_C - \psi_B &= \arccos \frac{k_{12}^2 - k_B^2 - k_C^2}{2k_B k_C}.\end{aligned}\quad (5)$$

Эти углы можно определить также и простым графическим построением, исходя из формул (4) и (5).

Если коэффициенты  $k_{12}$ ,  $k_A$  и  $k_D$  представить в виде сторон треугольника (рис. 1б), то эти углы представятся внешними углами треугольника со сторонами  $k_{12}$ ,  $k_A$  и  $k_D$ .

Полученные таким образом углы  $\varphi_D$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_D - \varphi_2$ ,  $\psi_C$ ,  $\psi_B$  и  $\psi_C - \psi_B$  определяют расположение углов 1 и 2 и тем самым конфигурацию сети.

Исходя из формул (4) и (5), можно сделать еще один интересный вывод: если предположить, что коэффициенты  $k_A$ ,  $k_B, \dots$  представляют силы, которые приложены к узлам сети и совпадают с направлением трассы сети, то при оптимальной конфигурации сети все эти силы будут находиться в состоянии равновесия.

Это обстоятельство позволяет решать вопросы конфигурации на механической модели, где сеть моделируется веревочным многоугольником. В тех точках, где находятся потребители, устанавливаются ролики, через которые проложена веревка с подвешенными на каждом конце нагрузками; величины нагрузок пропорциональны коэффициентам  $k_A$ ,  $k_B, \dots$ . Положение веревочного многоугольника, которое получается в случае равновесия в результате действия вышеупомянутых сил, соответствует оптимальной конфигурации сети.

Для практического пользования этот путь определения оптимальной конфигурации сети является слишком громоздким, причем точность результатов этого метода зависит от трения в подвижных частях модели.

Поэтому заслуживают внимания другие методы, основанные на графоаналитическом принципе и позволяющие получить решение с желаемой точностью.

В работе Н. Г. Гейнина (1) рассматривается случай соединения сетью трех точек, причем оптимальный узел определяется способом, который основан на применении «теоремы трисекционирования», что ведет к очень сложным построениям, и поэтому пользование этим методом при четырех и более точках, подлежащих соединению, нецелесообразно. К чрезмерно сложным графическим построениям ведут и другие методы определения наивыгоднейшей конфигурации сети, в том числе разработанные в смежных областях техники (5, 6, 7).

Поэтому в данном случае следует предпочесть простой метод нахождения узловых точек при помощи шаблонов, на которые предварительно нанесены углы (6). Этот метод легко применим при большом количестве

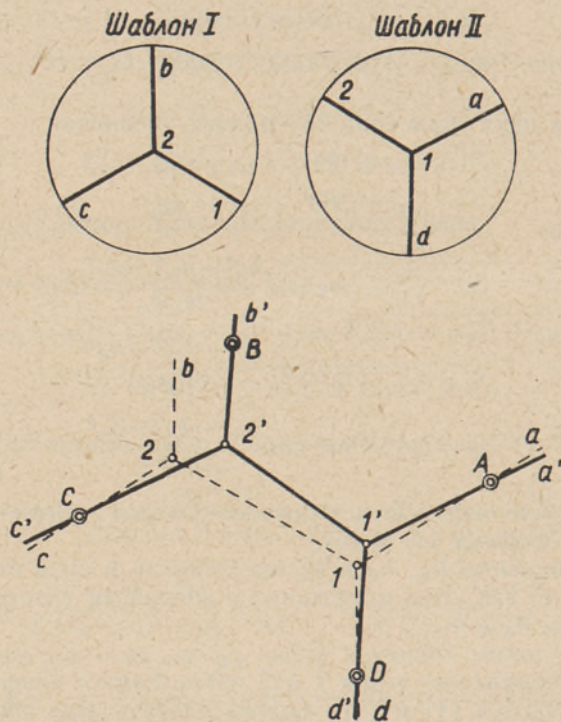


Рис. 2. Использование шаблонов для нахождения узловых точек сети.

точек, подлежащих соединению, и дает возможность учитывать все ограничивающие условия, связанные с выбором трассы электросети.

Изучение структуры распределения капиталовложений, расходов металла и эксплуатационных расходов вдоль радиуса действия сети показало, что при определении оптимальной конфигурации сельскохозяйственной сети целесообразно исходить из минимальных капиталовложений на сеть, что приводит также и к приемлемому решению в отношении эксплуатационных расходов и затрат металла.

При определении оптимальной конфигурации сети, соответствующей минимальным капитальным затратам, углы в узлах сети определяются при помощи формул (4) и (5). В качестве коэффициентов используются показатели стоимости километра линии. Для этого надо знать сечение каждого участка, т. е. надо иметь уже расчеты сети для какой-то конфигурации, значительно отличающейся от той конфигурации, которую мы получаем при расчете углов при помощи показателей стоимости.

В случае сельских сетей, в условиях, где сечения определяются по потере напряжения и плотности тока незначительны, можно использовать в качестве исходной конфигурацию сети с наименьшей протяженностью.

На основании формул (4) и (5) не трудно видеть, что для случая, когда сеть должна иметь наименьшую протяженность, углы в узлах сети получаются одинаковыми и равняются  $120^\circ$ .

Проследим на примере, как следует применять шаблоны для нахождения узлов сети в данном случае.

Шаблоны можно изготовить из кальки или другого прозрачного материала. На каждом шаблоне вычерчиваются три луча, исходящие из одной точки, причем углы между лучами равняются  $120^\circ$ .

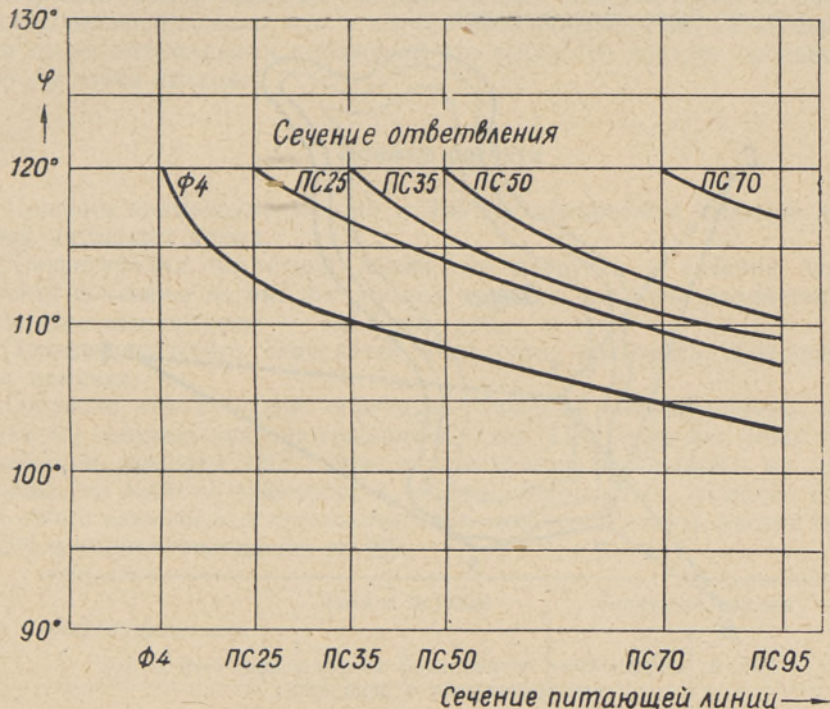


Рис. 3. Оптимальные с точки зрения капиталовложений углы в узле между питающей линией и ответвлением для сети 10 квт.

Шаблоны с нанесенными на них лучами изображены в верхней части рис. 2 в виде кругов. На нижней части рисунка отмечены точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ , которые подлежат соединению сетью при помощи шаблонов I и II.

Шаблон II накладывается на рисунок так, чтобы его лучи  $1a$  и  $1d$  проходили через точки  $A$  и  $D$  (на рисунке это положение показано пунктиром).

Шаблон I накладывается таким образом, чтобы его луч  $21$  совпал с лучом  $12$  на шаблоне II и луч  $2c$  проходил через точку  $C$ . Если теперь луч  $2b$  проходил бы через точку  $B$ , то мы имели бы уже решение вопроса, но обычно получить точного прохождения лучей через точки при первой попытке расстановки шаблонов не удается и приходится повторить операцию наложения шаблонов еще раз, изменив в некоторой мере положение шаблонов. Повернув шаблон II на некоторый угол по часовой стрелке, получим направления лучей  $1'a'$ ,  $1'd'$  и  $1'2'$ . Накладывая шаблон II так, чтобы его луч  $2'1'$  совпал с лучом  $1'2'$  первого шаблона, можно в резуль-

тате получить такое положение, когда лучи  $2'c'$  и  $2'b'$  проходят через точки  $C$  и  $B$ , что и будет искомым решением задачи. Положение центральных точек определяет оптимальные места узлов, а направления лучей совпадают с направлением линий, при помощи которых следует соединить точки  $A, B, C$  и  $D$ .

Для полученной сети, имеющей наименьшую протяженность, производится обычными способами электрический расчет сечений для всех участков и устанавливаются удельные показатели стоимости участков сети. На основе этих стоимостных показателей, с использованием формул (4) и (5) определяются углы в узлах сети, теперь уже для условий обеспечения минимальных капиталовложений на сеть. Полученные углы наносятся на шаблоны, при помощи которых определяется конфигурация сети точно так же, как это было описано выше.

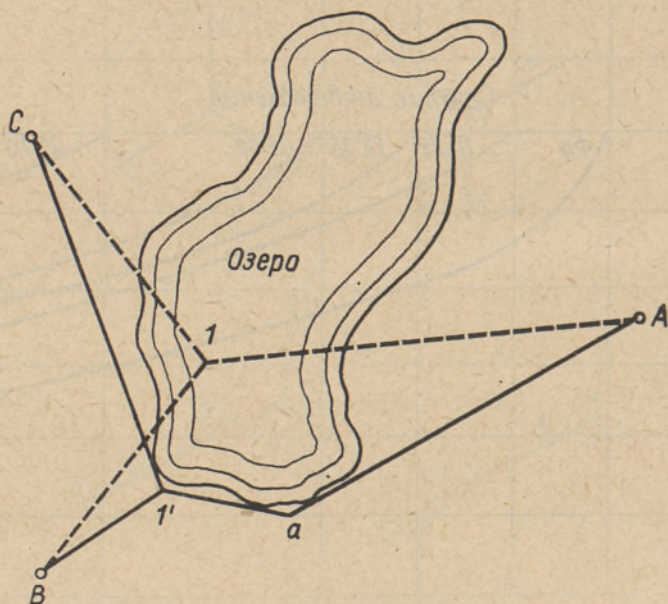


Рис. 4. Определение оптимальной конфигурации сети в случае препятствия в виде озера.

Вслед за этим, в случае необходимости, должна быть произведена проверка электрического расчета сети с целью выявления возможности уменьшения сечений проводов на головном участке сети и соответствующая корректировка узловых углов сети.

На рис. 3 приведен график, позволяющий ориентировочно определить оптимальные, с точки зрения капитальных затрат, углы в узле между питающей линией и ответвлением для сети 10 кВ при предварительном определении конфигурации сети.

Как показали расчеты, в большинстве случаев для определения конфигурации сети бывает достаточным уже первое приближение, так как второе приближение улучшает показатели сети всего на 1—2%.

Получаемая вышеуказанным способом оптимальная конфигурация сети является наилучшим вариантом, от которого затем приходится отступать в силу местных условий, ограничивающих свободу трассировки линий (озера, болота, и т. п.).

Рассмотрим теперь случай, когда при определении конфигурации сети, соединяющей три точки, на трассе сети встречается препятствие, например в виде озера, как это показано на рис. 4.

Отсутствие препятствия позволило бы осуществить оптимальную конфигурацию сети с расположением узла в точке *I*, но ввиду наличия озера приходится прокладывать линию вдоль его берега в нижней части рисунка. Направление линии *Aa* можно отметить заранее, и шаблон с лучами накладывается на рисунок таким образом, чтобы луч *I'a* проходил вдоль берега, а остальные два луча проходили бы через *C* и *B*. Этим определяется место узла *I'*, и тем самым мы получаем оптимальную конфигурацию сети с учетом влияния препятствия на выбор трассы сети, при которой перерасход средств будет наименьшим.

Путем аналитического и графического построения изолиний стоимости определяются условия, при соблюдении которых отступление от оптимальной конфигурации приводит к наименьшим дополнительным расходам. Исследование показало, что в случае необходимости перемещения узлов сети из их оптимальных положений это смещение следует производить в сторону точки питания.

### Пример расчета

Поясним применение метода углов на конкретном примере расчета одной питающей линии.

Конфигурация питающей линии, ее нагрузки и сечения согласно проекту показаны на рис. 5а. Расход металла при этом равняется 11,1 т и капитальные затраты — 138,8 тыс. руб.

Произведем теперь перерасчет этой сети, пользуясь вышеприведенным методом.

Согласно методу углов определим сначала конфигурацию, которая имела бы наименьшую протяженность сети. При этом все углы в узлах принимаем равными  $120^\circ$ . Эта конфигурация изображена на рис. 5б. Результаты расчета приведены в таблице (вариант I), согласно которым при сети с наименьшей протяженностью можно сократить расход металла на 5% и капиталовложения на 9%.

Конфигурация сети	Расход металла		Капиталовложения	
	т	%	тыс. руб.	%
По проекту	11,1	106	138,8	110
Вариант I	10,6	101	127,4	101
Вариант II	10,5	100	125,8	100

Произведем теперь изменение конфигурации сети с учетом показателей стоимости одного километра линии. При этом изменится расположение одного узла в сети (*A'* перемещается в *A''*), что позволит получить конфигурацию сети (вариант II), при которой расход металла будет на 6% и капиталовложения на 10% меньше, чем при первоначальном варианте.

### Выводы

При выборе конфигурации высоковольтной распределительной сети оптимальное решение можно получить при помощи предложенного в настоящей работе графоаналитического метода, позволяющего учитывать общие условия распределения электроэнергии, а также местные условия, ограничивающие свободу выбора конфигурации.



Исследование показало, что в зависимости от того, имеем ли мы дело с легкой или тяжелой сетью, получается различное решение в смысле определения наиболее целесообразной конфигурации сети.

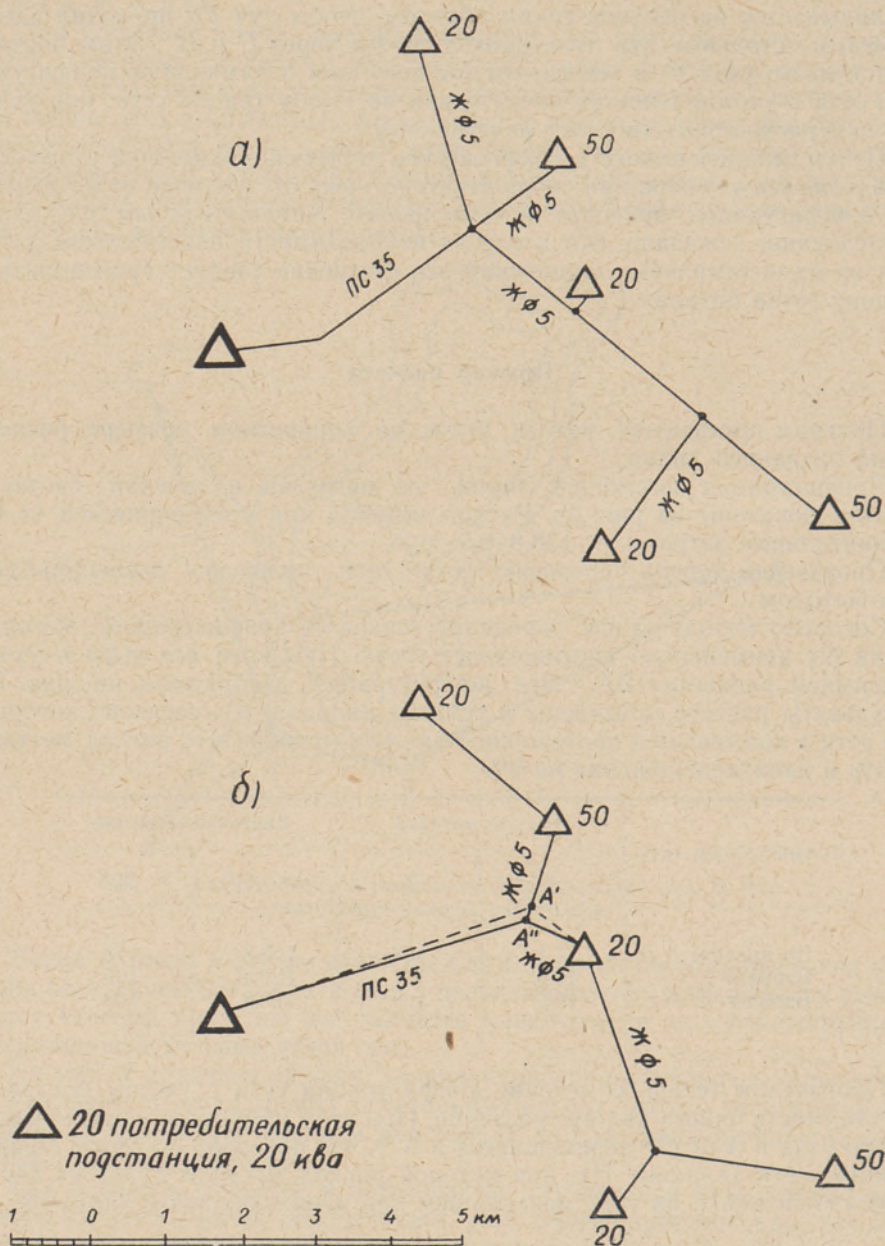


Рис. 5. Определение конфигурации питающей линии при помощи метода углов.

В области легких сетей (т. е. когда сечения проводов близки к тем, которые отвечают требованиям механической прочности) решающее значение имеет сокращение длины сетей. В этом случае задача сводится к нахождению такого типа конфигурации, при которой сеть имеет наимень-

шую протяженность, а это достигается тем, что углы в узлах сети принимаются равными  $120^\circ$ .

На периферии сети такая конфигурация целесообразна также с точки зрения концентрации потоков мощности, что вытекает из характера изменения коэффициента одновременности в зависимости от числа потребителей.

В области тяжелых сетей решение вопроса о выборе конфигурации сети с целью максимального сокращения капитальных затрат или эксплуатационных расходов можно получить также при помощи метода углов, используя последовательное приближение, принимая за исходную конфигурацию сети конфигурацию с наименьшей протяженностью. На более тяжелых участках сети целесообразно применять конфигурацию лучевого характера с более выравненной трассой питающей линии, так как в этом случае преобладающее значение имеют переменные затраты (т. е. зависящие от сечения проводов).

Настоящая работа выполнена под руководством доктора технических наук А. Г. Захарина.

*Институт энергетики*  
*Академии наук Эстонской ССР*

Поступила в редакцию  
3 I 1955

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Гейнин, Оптимальное местоположение узловой точки в трехлучевых схемах электросетей, «Электричество», № 3, 1946.
2. Д. Л. Гомберг, О рационализации трассировки водопроводных, газовых и теплофикационных сетей, «Коммунальное строительство», № 8—9, 1939.
3. В. Иванов, Исследование влияния экономических условий на начертание в некоторых частных случаях водопроводной и оросительной сети, Киев, 1908.
4. А. И. Сегаль, К задаче о свозе грузов из нескольких пунктов, «Горный журнал», № 12, 1920.
5. В. Г. Холмский, Л. Л. Брискман, Оптимальная точка питания л-лучевой звезды, Труды Института теплоэнергетики АН УССР, Сборник № 3, Киев, 1950.
6. Л. Д. Шевяков, О наименьшей работе по доставке грузов между тремя пунктами, «Уголь и железо», № 41, 1929.
7. Б. Л. Шифринсон, Т. К. Леонтьева, Трассирование тепловых сетей, «Электрические станции», № 3, 1950.