

УДК 621.316:631.371

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАДИУСОВ ДЕЙСТВИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Докт. техн. наук, проф. РУСАН В. И., инж. ПУХАЛЬСКАЯ О. Ю.

*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого*

Определение оптимального радиуса действия распределительных электрических сетей относится к техническим мероприятиям и средствам повышения надежности электроснабжения потребителей. Особенно актуальными являются исследования радиуса действия распределительных сетей, питающих сельскохозяйственных потребителей.

При решении этой задачи необходимо одновременно учитывать ряд факторов: принимаемую систему напряжений (35/6–20 кВ, 110/35/6–20 кВ и др.), используемую для электроснабжения; количество питающих подстанций; число распределительных линий, отходящих от питающих подстанций; количество потребительских трансформаторных подстанций напряжением 6–20/0,38 кВ; количество и длину линий напряжением 0,38 кВ, отходящих от трансформаторных подстанций [1].

Нахождение оптимального радиуса действия электрической сети – задача оптимизации. Для ее решения необходимо составить целевую функцию в виде удельных затрат, включающих составляющие затрат на сети различных напряжений и подстанции для ступенчатой трансформации электроэнергии. Минимум целевой функции позволяет найти наиболее целесообразные решения с учетом различных факторов. При этом необходимо обязательно учитывать фактор времени, т. е. изменение нагрузки по годам, разновременность затрат и надежность электроснабжения потребителей.

При рассмотрении вопросов распределения электроэнергии общепринятым понятием является поверхностная плотность нагрузки  $P_0$ , кВт/км<sup>2</sup> [2]. Проводить теоретические исследования целесообразно с помощью абстрагированных схем.

Электрические нагрузки сельскохозяйственных районов в определенной степени пропорциональны площади земельных угодий. Они более равномерно распределены по территории по сравнению с нагрузками в про-

мышленности или в городах. Поэтому при определении оптимального радиуса действия сельской распределительной сети нагрузки будем рассчитывать исходя из удельной поверхностной плотности  $P_0$ , кВт/км<sup>2</sup>, считая их сосредоточенными в населенных пунктах.

Рассмотрим любую практически неограниченную территорию в виде квадрата со стороной  $2a$ , заведомо большую, чем может быть охвачена от одной подстанции. Формой квадрата целесообразно воспользоваться как наиболее простой геометрической фигурой.

Радиус вписанной в квадрат окружности будем условно называть радиусом охвата. Получив конечные результаты, квадрат можно заменить площадью равновеликого шестиугольника, круга или любой другой геометрической фигуры и соответствующим образом пересчитать радиус. Понятие «радиус охвата», или «радиус действия» сети, характеризует прежде всего размер территории, нагрузки которой питаются от подстанции рассматриваемого напряжения [2].

Рассмотрим вопрос нахождения оптимального радиуса действия распределительной сети напряжением 10 кВ, подключаемой к питающей подстанции напряжением 110(35)/10 кВ и питающей сельскохозяйственных потребителей.

Удельные расчетные затраты по передаче и распределению электроэнергии с учетом перспективного роста нагрузок описываются уравнением [3]

$$Z_t = \frac{m_n P^*}{2R} + \frac{\psi n P^* P_t R}{4\sqrt{3}U \cos \varphi_j} + \frac{\sqrt{3}\psi\beta\rho\tau P_t j_t}{4U \cos \varphi \cdot 10^3} R + \frac{m_{nc} P^*}{4R^2}, \quad (1)$$

где  $m_n$  – составляющая стоимости линии, не зависящая от сечения проводов, руб.;  $P^*$  – коэффициент, учитывающий ежегодные отчисления от первоначальных вложений;  $R$  – радиус действия распределительной сети, км;  $\psi$  – коэффициент, характеризующий территориальное размещение нагрузки;  $n$  – то же, учитывающий возрастание стоимости линии в зависимости от сечения проводов, руб.;  $t$  – время эксплуатации, лет;  $U$  – напряжение распределительной сети, кВ;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности нагрузки распределительной сети;  $j_t$  – плотность тока в проводах в момент времени  $t$ , А/мм<sup>2</sup>;  $\beta$  – стоимость электроэнергии, руб./(кВт·ч);  $\rho$  – удельное сопротивление проводов, Ом·мм<sup>2</sup>/км;  $\tau$  – время максимальных потерь, ч;  $P_t$  – поверхностная плотность нагрузки в момент времени  $t$ , кВт/км<sup>2</sup>;  $m_{nc}$  – постоянная часть стоимости подстанции, руб.

При выборе оптимального радиуса действия сети необходимо учитывать фактор надежности электроснабжения, т. е. в суммарные расчетные затраты необходимо включить такую составляющую, как ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям при перерывах электроснабжения:

$$Y = y_0 \Delta W = y_0 \frac{W_n}{8760} N \tau = y_0 \frac{W_n}{8760} \tau_\Sigma, \quad (2)$$

где  $y_0$  – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям, руб./(кВт·ч);  $W_n$  – величина годового потребления активной электрической энергии, кВт·ч;  $N$  – количество внезапных отключений потребителей в год, откл./год;  $\tau$  – средняя продолжительность одного внезапного отключения, ч.

Для ВЛ 10 кВ значение ущерба примет вид

$$Y = y_0 \frac{W_{\text{н}}}{8760} \tau_{10}, \quad (3)$$

где  $\tau_{10}$  – годовая расчетная продолжительность отключений распределительных линий 10 кВ, которая определяется по формуле

$$\tau_{10} = \alpha_{10} l_{10}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{10}$  – удельная годовая расчетная продолжительность отключений линий 10 кВ, ч/(год·км). Для ВЛ 10 кВ при расчетах принимается  $\alpha_{10} = 0,9$  ч/(год·км) [3].

То есть вероятная длительность отключений потребителя пропорциональна длине ВЛ. Тогда ущерб от недоотпуска электроэнергии

$$Y_t = y_0 \frac{W_{\text{н}}}{8760} \alpha_{10} K_{\text{кр}} R, \quad (5)$$

где  $K_{\text{кр}}$  – коэффициент кривизны трассы магистрали ВЛ.

Так как поверхностная плотность нагрузки и плотность тока являются функцией времени, динамику перспективного роста нагрузок можно описать следующими формулами:

$$P_t = P_0 (1 + \varepsilon)^t; \quad j_t = j_0 (1 + \varepsilon)^t, \quad (6)$$

где  $P_0$  – исходная поверхностная плотность нагрузки, кВт/км<sup>2</sup>;  $j_0$  – начальная плотность тока в проводах, А/мм<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – коэффициент, характеризующий динамику роста нагрузок.

Динамика перспективного роста электропотребления

$$W_{\text{н}} = W_{\text{н}0} (1 + \varepsilon)^t, \quad (7)$$

где  $W_{\text{н}0}$  – исходная величина годового потребления активной электрической энергии, кВт·ч.

Удельные расчетные затраты по передаче и распределению электроэнергии с учетом надежности электроснабжения, перспективного роста нагрузок и дисконтирования затрат опишутся уравнением

$$Z_t = \frac{\frac{m_{\text{н}} P^*}{2R} + \frac{\psi n P^* P_t R}{4\sqrt{3}U \cos \varphi j_t} + \frac{\sqrt{3}\psi \beta \rho \tau P_t j_t R}{4U \cos \varphi \cdot 10^3} + \frac{m_{\text{нс}} P^*}{4R^2} + \frac{y_0 \alpha_{10} K_{\text{кр}} W_{\text{н}} R}{8760}}{(1 + E)^t}. \quad (8)$$

где  $E$  – норма дисконта.

Расчетные затраты по передаче и распределению электроэнергии за весь период  $T$  составят

$$Z = \sum_{t=0}^T \frac{\frac{m_{\text{н}} P^*}{2R} + \frac{\psi n P^* P_t R}{4\sqrt{3}U \cos \varphi j_t} + \frac{\sqrt{3}\psi \beta \rho \tau P_t j_t R}{4U \cos \varphi \cdot 10^3} + \frac{m_{\text{нс}} P^*}{4R^2} + \frac{y_0 \alpha_{10} K_{\text{кр}} W_{\text{н}} R}{8760}}{(1 + E)^t}. \quad (9)$$

Если расчетный период равен  $T$  годам, то:

$$P_T = P_0(1 + \varepsilon)^T; \quad j_0 = \frac{j_k}{(1 + \varepsilon)^T}; \quad W_{nT} = W_{n0}(1 + \varepsilon)^T, \quad (10)$$

где  $j_k$  – конечная (предельно допустимая) плотность тока в проводах для заданного расчетного срока.

Расчетный срок принят равным восемь лет. Тогда

$$\begin{aligned} 3 = & \frac{m_n P^*}{2R} \sum_{t=0}^7 \frac{1}{(1 + E)^t} + \frac{\psi n P^* P_0 R}{4\sqrt{3}U \cos \varphi j_k} \sum_{t=0}^7 \frac{(1 + \varepsilon)^{2t}}{(1 + E)^t} + \frac{\sqrt{3}\psi\beta\rho\tau P_0 j_k R}{4U \cos \varphi \cdot 10^3} \sum_{t=0}^7 \frac{1}{(1 + E)^t} + \\ & + \frac{m_{nc} P^*}{4R^2} \sum_{t=0}^7 \frac{1}{(1 + E)^t} + \frac{y_0 \alpha_{10} K_{кр}}{8760} W_{n0} R \sum_{t=0}^7 \frac{(1 + \varepsilon)^t}{(1 + E)^t}. \end{aligned} \quad (11)$$

Приравняв производную  $dZ/dR$  к нулю, после преобразований получим

$$\begin{aligned} \left( \frac{\psi n P^* P_0}{4\sqrt{3}U \cos \varphi j_k} \sum_{t=0}^7 \frac{(1 + \varepsilon)^{2t}}{(1 + E)^t} + \frac{\sqrt{3}\psi\beta\rho\tau P_0 j_k}{4U \cos \varphi \cdot 10^3} \sum_{t=0}^7 \frac{1}{(1 + E)^t} + \frac{y_0 \alpha_{10} K_{кр}}{8760} W_{n0} \sum_{t=0}^7 \frac{(1 + \varepsilon)^t}{(1 + E)^t} \right) R^3 - \\ - \frac{m_n P^*}{2} \sum_{t=0}^7 \frac{1}{(1 + E)^t} R - \frac{m_{nc} P^*}{2} \sum_{t=0}^7 \frac{1}{(1 + E)^t} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

В уравнение (12) подставляем следующие значения (стоимостные показатели приняты в ценах 1980 г. [4]):

$$U = 10 \text{ кВ}; \quad \rho = 0,31 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{км}; \quad \cos \varphi = 0,9; \quad \varepsilon = 0,1;$$

стоимостные показатели:

$$n = 12 \text{ руб./мм}^2; \quad m_{nc} = 10 \cdot 10^3 \text{ руб.}; \quad m_n = 0,5 \cdot 10^3 \text{ руб.}; \quad \beta = 0,02 \text{ руб./кВт}\cdot\text{ч};$$

$$P_0 = 5 \text{ кВт/км}^2; \quad P^* = 0,1; \quad j_k = 2,15 \text{ А/мм}^2; \quad \psi = 3; \quad \tau = 1430 \text{ ч}; \quad E = 10 \%;$$

расчетный срок  $T = 8$  лет (т. е.  $t = 0-7$ );

$\alpha_{10} = 0,9 \text{ ч/год}\cdot\text{км}$ ;  $K_{кр} = 1,4$ ;  $y_0$  – взяты значения от 0,05 до 0,75 руб./кВт·ч;  
 $W_{n0} = 100000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ .

Тогда для разных значений  $y_0$  получим уравнения, представленные в табл. 1. Действительные корни уравнения также сведены в табл. 1.

Таблица 1

Определение оптимального радиуса действия сети 10 кВ

$y_0$ , руб./кВт·ч)	Уравнение	$R_{\text{опт}}$ , км
0,05	$7,37R^3 - 146,71R - 2934,2 = 0$	8,25
0,1	$13,12R^3 - 146,71R - 2934,2 = 0$	6,68
0,24	$29,23R^3 - 146,71R - 2934,2 = 0$	5,01
0,4	$47,64R^3 - 146,71R - 2934,2 = 0$	4,21
0,55	$64,90R^3 - 146,71R - 2934,2 = 0$	3,77
0,75	$87,92R^3 - 146,71R - 2934,2 = 0$	3,39

На рис. 1 показана зависимость оптимального радиуса действия сельской электрической сети 10 кВ от удельного ущерба.

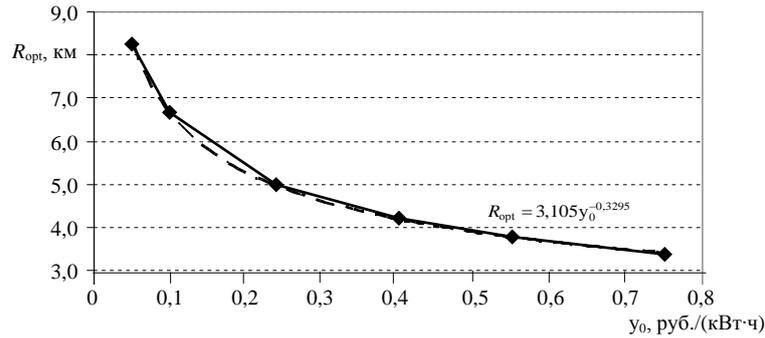


Рис. 1. Зависимость оптимального радиуса действия сельской распределительной сети от удельного ущерба ( $E = 10\%$ )

С помощью метода наименьших квадратов установлена форма зависимости  $R_{opt}$  от  $y_0$ :  $R_{opt} = 3,105 y_0^{-0,3295}$ .

Для того чтобы установить, соответствует ли выбранная регрессионная модель полученным данным, используется основное уравнение дисперсионного анализа

$$Q = Q_{\phi} + Q_o, \quad (13)$$

где  $Q$  – общая сумма квадратов отклонений выходной переменной от средней;  $Q_{\phi}$  – сумма квадратов, обусловленная регрессией;  $Q_o$  – остаточная сумма квадратов.

Для заданного уровня  $\alpha$  находим критическое значение распределения  $F_{кр}$  Фишера при  $k_1 = l - 1$ ;  $k_2 = n - l$  степенях свободы ( $n$  – число наблюдений,  $l$  – число оцениваемых параметров в несгруппированной выборке).

Если статистика

$$t = \frac{Q_{\phi} (n - 1)}{Q_o (l - 1)} > F_{кр}, \quad (14)$$

то уравнение регрессии считается значимым, т. е. соответствующим экспериментальным данным на уровне значимости  $\alpha$ .

Для нашего случая на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  имеем  $F_{кр} = 7,71$  [5] и  $t > F_{кр}$ , следовательно, уравнение регрессии значимо.

Для сравнения выполнен расчет оптимального радиуса действия распределительной сети без учета надежности электроснабжения потребителей  $R_{opt} = 14,75$  км.

На рис. 2 показаны зависимости  $R_{opt} = f(W, y_0)$ .

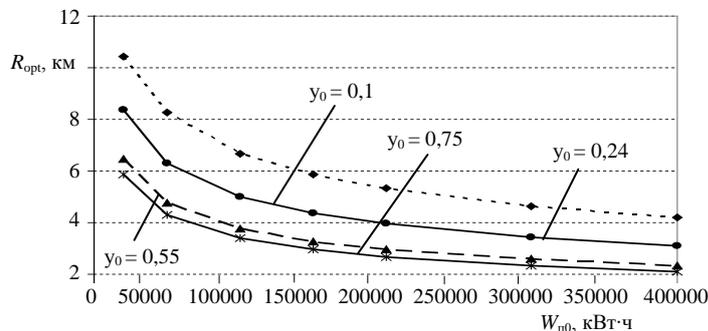


Рис. 2. Зависимость оптимального радиуса действия сельской распределительной сети от годового потребления электроэнергии  $W_{n0}$ , кВт·ч, и удельного ущерба  $y_0$ , руб./кВт·ч,  $E = 10\%$

В табл. 2 приведены значения оптимального радиуса  $R_{opt}$ , полученные для нормы дисконта  $E$  в диапазоне 10–14 % и различных значений удельного ущерба  $y_0$ , при исходном годовом потреблении активной электрической энергии  $W_{п0} = 100000$  кВт·ч.

Таблица 2

Зависимости  $R_{opt}$  от удельного ущерба и нормы дисконта

$y_0$ , руб./кВт·ч	0,05	0,1	0,24	0,4	0,55	0,75
$E$ , %	$R_{opt}$ , км					
14	8,32	6,73	5,04	4,24	3,80	3,41
13	8,30	6,72	5,03	4,23	3,79	3,41
12	8,29	6,71	5,02	4,22	3,79	3,40
11	8,27	6,69	5,02	4,22	3,78	3,40
10	8,25	6,68	5,01	4,21	3,77	3,39

Анализ полученных данных показывает, что норма дисконта  $E$  в пределах 10–14 % не оказывает существенного влияния на значение оптимального радиуса действия распределительной сети.

### ВЫВОДЫ

Исследовано влияние различных факторов на значение оптимального радиуса действия сельской распределительной сети 10 кВ. Значение оптимального радиуса действия электрических распределительных сетей, полученное без учета надежности электроснабжения потребителей, составило 14,75 км. Учет фактора надежности привел к сокращению оптимального радиуса до 3,39–8,25 км (в зависимости от величины удельного ущерба).

В реальных условиях проектирования возможны некоторые отклонения от расчетного значения  $R_{opt}$ , связанные с местоположением источников электроэнергии или необходимостью охвата электроэнергией всех потребителей [3].

В перспективе необходимо стремиться к снижению радиуса действия сельских сетей 10 кВ примерно до 7 км, как это принято во многих зарубежных странах [6], что позволит сократить количество повреждений и уменьшить ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фадеева, Г. А. Проектирование распределительных электрических сетей: учеб. пособие / Г. А. Фадеева, В. Т. Федин; под общ. ред. В. Т. Федина. – Минск: Вышэйш. шк., 2009. – 365 с.
2. Плюгачев, В. К. Основы рационального электроснабжения сельского хозяйства / В. К. Плюгачев. – Минск: Сельхозгиз БССР, 1962. – 233 с.
3. Будзко, И. А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов / И. А. Будзко, М. С. Левин. – М.: Агропромиздат, 1985. – 320 с.
4. Поспелов, Г. Е. Надежность электроустановок сельскохозяйственного назначения / Г. Е. Поспелов, В. И. Русан. – Минск: Ураджай, 1982. – 166 с.
5. Белько, И. В. Теория вероятностей и математическая статистика. Примеры и задачи: учеб. пособие / И. В. Белько, Г. П. Свирид; под ред. К. К. Кузьмича. – 2-е изд. – Минск: Новое знание, 2004. – 251 с.
6. Лещинская, Т. Б. Электроснабжение сельского хозяйства / Т. Б. Лещинская, И. В. Наумов. – М.: КолосС, 2008. – 650 с.

Представлена кафедрой  
электроснабжения ГГТУ

Поступила 18.01.2011