

**А. В. Каминский к. т. н.**

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ КОРОТКОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

*В работе предлагаются математические модели и метод определения максимальной длины коротких линий проектируемой системы электроснабжения. Предложенный метод можно использовать на начальных стадиях проектирования, когда реальные длины линий, их нагрузка и сечения могут быть неизвестными. Это дает возможность обосновать правомерность использования методов оптимального проектирования коротких электросетей, которые будут гарантировать оптимальность и допустимость системы электроснабжения в целом.*

**Ключевые слова:** короткая электросеть, максимальная длина короткой линии, нижняя граница максимальной длины, оптимальная электросеть.

Проектирование оптимальной системы электроснабжения (СЭС) является сложной задачей, при решении которой необходимо учитывать взаимное влияние одних этапов проектирования на другие. Выбор отдельных подсистем единой СЭС по результатам независимых оптимизационных расчетов, как правило, не обеспечивает оптимальности системы в целом и даже не гарантирует ее допустимости. Формально это объясняется тем, что принятые проектные решения на предыдущих этапах проектирования могут изменить область допустимых решений задач выбора оптимальных параметров, элементов и подсистем СЭС на следующих этапах проектирования [1]. Поэтому эффективность оптимальных проектных решений, принятых на следующих этапах проектирования, может уменьшиться и привести к снижению эффективности проекта в целом. В частности, это касается задач выбора оптимальных сечений распределительных электросетей, которые отходят от источника питания (ИП) к трансформаторным подстанциям потребителей электроэнергии, и координат размещения самого ИП.

Оптимальные координаты размещения ИП зависят от технико-экономических характеристик линий питания, в частности, от сечений и длин этих линий. Длины линий, в свою очередь, непосредственно зависят от координат размещения ИП и могут повлиять на допустимость использования тех или других сечений этих линий. Возникает дилемма, которой можно было бы избежать, решая обе задачи сразу, как одну оптимизационную задачу с общими управляемыми переменными. Однако, в данное время не существует универсальных методов решения этой общей задачи. Анализ трудностей, которые возникают на этом пути и некоторые способы их преодоления, приведены в работе [1]. В этой работе, в частности, доказано, что описанная выше дилемма исчезает, если распределительные сети являются короткими.

Понятие короткой линии и максимальной длины такой линии введены в работах [1 – 3]. Линия является короткой, если при любой ее допустимой нагрузке потеря напряжения в этой линии будет допустимой. Короткая линия имеет максимально возможную длину, если при любой большей длине и максимально допустимой нагрузке потеря напряжения в этой линии становится недопустимой.

В работе [1] показано, что оптимальное сечение короткой линии, которую выбирают по таким показателям эффективности как: стоимость, потери активной мощности, расход цветного металла, годовые приведенные затраты и другие, не зависит от ее длины. Поэтому оптимальное сечение коротких линий по критериям минимума перечисленных выше показателей эффективности можно определить, используя удельные значения этих показателей на единицу длины линии. После этого оптимальные координаты размещения источника питания могут быть определены с использованием всех необходимых для этого технико-экономических параметров предварительно выбранных линий. Это даст возможность избежать сложных расчетов по согласованию результатов решения задач выбора оптимальных сечений линий и оптимальных

координат размещения ИП. Вот почему на начальной стадии проектирования СЭС важно уметь оценить, все ли линии распределительной сети будут короткими. В таком случае их оптимальные сечения не зависят от длины линий и могут быть выбраны окончательно до определения координат размещения ИП.

Любая линия заданной марки и сечения будет короткой, если ее длина  $L_K$  не превышает максимальную длину соответствующей короткой линии  $L_{Kmax}$  [1], т. е.

$$L_K \leq L_{Kmax}. \quad (1)$$

Максимально возможные значения для  $L_K$  всегда можно оценить исходя из условий проектирования СЭС. Поэтому важно уметь определять также максимальную длину короткой линии  $L_{Kmax}$  заданной марки и сечения. Это даст возможность, используя соотношение (1), оценить, будет ли линия длиной  $L_K$  короткой.

Приведем обоснование метода определения максимальной длины коротких кабельных (КЛ) и воздушных (ВЛ) ЛЭП 0,38 – 35 кВ.

Поскольку для местных сетей, напряжением меньше 110 кВ, потеря напряжения  $\Delta U$  приблизительно равняется продольной составляющей падения напряжений [4], то ее можно определить по формуле:

$$\Delta U = \frac{R_0(x) \cdot P + X_0(x) \cdot Q}{U} \cdot L = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))}{U} \cdot L,$$

где  $R_0(x)$ , – удельное активное сопротивление линии сечением  $x$ ;  $P$  – активная нагрузка линии;  $X_0(x)$  – удельное реактивное сопротивление линии сечением  $x$ ;  $Q$  – реактивная нагрузка линии;  $L$  – длина линии;  $U$  – напряжение линии;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между напряжением и током.

Потеря напряжения, обычно, определяется в процентах от номинального напряжения. В этом случае последняя формула будет иметь вид:

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))}{U} \cdot L \cdot 100.$$

Чаще всего в инженерных расчетах для напряжения, тока, удельного сопротивления и длины линии используют единицы измерения кВ, А, Ом/км, км соответственно. Для определения  $\Delta U\%$  с использованием этих единиц измерения соответствующих параметров последнюю формулу представим в таком виде:

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))}{10 \cdot U} \cdot L.$$

Из последнего выражения определим длину линии, которая соответствует потере напряжения  $\Delta U\%$  и нагрузке  $I$  для принятых единиц измерения напряжения, тока, удельного сопротивления и длины:

$$L = \frac{10 \cdot \Delta U\% \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))} \quad (2)$$

Для того, чтобы определить максимальную длину короткой линии  $L_{Kmax}$  сечением  $x$ , которая отвечает максимально допустимой потере напряжения  $\Delta U\% = \Delta U_{доп}\%$  и максимально допустимой по ПУЭ [5] нагрузке  $I = I_{доп}(x)$ , необходимо подставить эти предельно допустимые значения параметров  $\Delta U\%$  и  $I$  в формулу (2). В результате получим:

$$L_{Kmax} = \frac{10 \cdot \Delta U_{доп}\% \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_{доп}(x) \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))} \quad (3)$$

Допустимые потери напряжения до конечных пунктов сети должны определяться в зависимости от уровней напряжения источника питания, исходя из нормированных в ГОСТ 13109-97 [6] отклонений напряжения на зажимах электроприемников в процентах относительно

номинального напряжения. В частности, в работе [7] обосновано, что для городских распределительных электросетей 6-10 кВ можно принимать  $\Delta U_{\text{доп}}\% = 6\%$ .

Из формулы (3), видно, что максимальная длина короткой линии зависит не только от ее марки и сечения, которые в совокупности определяют числовые значения параметров  $I_{\text{доп}}(x)$ ,  $R_0(x)$ ,  $X_0(x)$ , но и от угла  $\varphi$  сдвига фаз между напряжением и током. Поэтому максимальную длину короткой линии заданной марки можно представить как функцию  $L_{\text{Кmax}}(x, \varphi)$  двух аргументов – сечения  $x$  и сдвига фаз  $\varphi$ .

Выше обосновано, что необходимость в оценке максимальной длины короткой линии возникает на начальных стадиях оптимального проектирования СЭС, когда значения параметров  $x$  и  $\varphi$ , как правило, еще неизвестны. Несмотря на это, во многих случаях существует возможность доказать, что линия, оптимальное сечение которой будет определяться на последующих этапах проектирования СЭС, является короткой.

Для этого необходимо определить нижнюю границу максимальной длины короткой линии  $HGL_{\text{Кmax}}$ , которая в случае выполнения условия  $L_{\text{К}} \leq HGL_{\text{Кmax}}$  гарантировала бы, что любая питающая линия длиной  $L_{\text{К}}$  при любых допустимых значениях её сечения и угла сдвига фаз между током и напряжением будет короткой.

Такая задача может быть сведена к решению оптимизационной задачи специального вида. В роли управляемых переменных этой задачи должны выступать сечение линии и угол сдвига фаз между током и напряжением, а в роли показателя эффективности решения, который необходимо минимизировать – функция  $L_{\text{Кmax}}(x, \varphi)$ .

Приведем математическую модель этой задачи для случая отдельной кабельной питающей линии. Пусть максимально возможная длина КЛ не может превышать  $L_{\text{К}}$ . В общем случае, питающая линия может состоять из одного или из двух кабелей. Математическая модель задачи для такой линии будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{Кmax}}(x, \varphi) &= \frac{10 \cdot \Delta U_{\text{доп}}\% \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{доп}}(x) \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))} \rightarrow \min_{x, \varphi}, \\ 0 &\leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, \\ I_{\text{доп}}(x) &\geq I; \\ k > 1 &\Rightarrow k_{\text{па}} \cdot I_{\text{доп}}(x) \geq \frac{k \cdot I \cdot k_{\text{ппа}}}{k-1}; \\ x &\geq x_{\text{кз}} = \frac{I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{t_{\text{п}}}}{C}; \\ x &\in X_{\text{ст}}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $I$  – ток отдельного кабеля КЛ;  $k$  – количество линий;  $k_{\text{па}}$  – максимально допустимый коэффициент нагрузки КЛ в послеаварийном режиме работы;  $k_{\text{ппа}}$  – часть общей нагрузки потребителя электроэнергии, которая должна передаваться по КЛ в послеаварийном режиме работы;  $x_{\text{кз}}$  – минимальное сечение линии по условию термического действия токов короткого замыкания (КЗ);  $I_{\text{кз}}$  – ток КЗ в начале КЛ;  $t_{\text{п}}$  – приведенное время КЗ;  $C$  – тепловой коэффициент, который зависит от номинального напряжения линии и материала проводника (задается для ВЛ и КЛ в таблицах 8, 9 ГОСТ 30323-95 [8]).  $X_{\text{ст}}$  – множество стандартных сечений КЛ.

Очевидно, что оценить нижнюю границу максимальной длины короткой линии  $HGL_{\text{Кmax}}$  можно по формуле  $HGL_{\text{Кmax}} = L_{\text{Кmax}}(x^*, \varphi^*)$ , где  $(x^*, \varphi^*)$  – решение модели (4), а любая питающая линия, длина которой не может превышать  $L_{\text{К}}$ , будет короткой, если будет выполняться условие

$L_{\text{К}} \leq HGL_{\text{Кmax}}$ . Поскольку с помощью модели (4), определяется нижняя граница возможных значений максимальной длины короткой линии, то обратное утверждение неверно.

Также требуется проверка сечений воздушных линий питания ПУЭ [5] на отсутствие

общего коронования и механическую прочность. Поэтому модель (4) для воздушных линий будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} L_{K\max}(x, \varphi) &= \frac{10 \cdot \Delta U_{\text{доп}} \% \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{доп}}(x) \cdot (r_0(x) \cdot \cos(\varphi) + x_0(x) \cdot \sin(\varphi))} \rightarrow \min_{x, \varphi}, \\ 0 &\leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, \\ I_{\text{доп}}(x) &\geq I; \\ k > 1 &\Rightarrow k_{\text{па}} \cdot I_{\text{доп}}(x) \geq \frac{k \cdot I \cdot k_{\text{ппа}}}{k-1}; \\ x &\geq x_{\text{кз}} = \frac{I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{t_{\text{п}}}}{C}; \\ x &\geq x_{\text{кор}} \\ x &\geq x_{\text{мех}} \\ x &\in X_{\text{ст}}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $x_{\text{кор}}$  – минимальное сечение ВЛ, в котором не возникает общего коронования;  $x_{\text{мех}}$  – минимальное сечение ВЛ по условию механической прочности.

В случае кабельной линии питания ограничения на отсутствие общего коронования и механической прочности сечения КЛ были опущены, поскольку выполнение этих условий гарантируют заводы изготовители кабельной продукции.

Если нагрузка питающей линии неизвестна, то в моделях (4), (5) необходимо опустить ограничение на допустимость нагревания линии в нормальном и послеаварийном режимах работы. В этом случае найденная в результате решения моделей (4), (5) нижняя граница возможных значений максимальной длины короткой линии будет касаться не отдельно взятой линии питания, а всех линий, которые будут отходить от источника питания. Поэтому все эти линии будут короткими, если максимально возможная длина каждой из них не будет превышать найденную величину  $HGL_{K\max}$ .

Управляемыми переменными в математических моделях (4), (5) выступают сечение линии и угол сдвига фаз между током и напряжением. Первая управляемая переменная может принимать только дискретные и нормированные значения, а вторая является непрерывной. Это является основной причиной отсутствия в данное время универсальных методов теории принятия решений для непосредственного решения задач по полученным моделям. Поэтому далее предлагается специальный метод решения поставленной задачи, который базируется на таких свойствах этой задачи:

1. Все условия, которым должно удовлетворять сечение питающей линии, как это видно из моделей (4) и (5), ограничивают эту управляемую переменную снизу. В таком случае нижняя граница области допустимых решений для сечений линии питания будет равной  $\max_i(x_{\text{min}_i})$ ,  $i=1, \dots, m$ , где  $x_{\text{min}_i}$  – минимально допустимое сечение линии, которое удовлетворяет  $i$ -тому ограничению;  $m$  – общее количество ограничений.

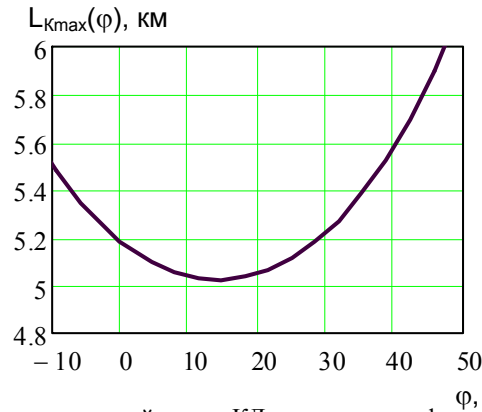


Рис. 1. Пример зависимости максимальной длины КЛ от угла сдвига фаз между током и напряжением

2. Зависимость максимальной длины короткой линии от угла сдвига фаз  $\varphi$  между напряжением и током линии при любом сечении этой линии на всем множестве возможных значений параметра  $\varphi$  есть одноэкстремальной, гладкой и выпуклой. Пример такой зависимости для кабеля с алюминиевыми жилами и бумажной пропитанной изоляцией представлен на рис. 1.

Поставленную задачу предлагаем решать в два этапа. На первом этапе необходимо найти нижнюю границу области допустимых сечений питающей линии  $x_{\text{доп}}$ , используя первое свойство задачи:

$$x_{\text{доп}} = \max_i(x_{\text{min}_i}), \quad i=1, \dots, m.$$

На втором этапе для всех стандартных сечений линии питания не меньших за  $x_{\text{доп}}$  – решить задачу:

$$L_{\text{Kmax}}(x_i, \varphi) = \frac{10 \cdot \Delta U_{\text{доп}} \% \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{доп}}(x) \cdot (R_0(x) \cdot \cos(\varphi) + X_0(x) \cdot \sin(\varphi))} \rightarrow \min_{\varphi}, \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} i=1, \dots, n, \quad (6)$$

$$0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$$

где  $n$  – количество стандартных сечений линии питания, которые соответствуют условию  $x_i \geq x_{\text{доп}}$ .

Задача минимизации функции  $L_{\text{Kmax}}(x_i, \varphi)$ , согласно модели (6) в силу свойства 2 этой задачи, может быть решена с помощью известных методов оптимизации и, в частности, с помощью градиентных методов, встроенных в такие математические САПР как: Mathcad, Matlab, Excel и прочие. В результате мы получим  $n$  решений  $\varphi_i^*$ ,  $i=1, \dots, n$ . Теперь нижнюю границу максимальной длины короткой линии легко найти по формуле:

$$HGL_{\text{Kmax}} = \min_i(L_{\text{Kmax}}(x_i, \varphi_i^*)), \quad i=1, \dots, n.$$

Получив этот результат, мы можем быть уверены, что любая линия заданной марки длиной  $L_K \leq HGL_{\text{Kmax}}$  будет короткой.

Проведенные автором исследования показали, что предложенный метод расчета максимальной длины короткой линии не сложно реализовать в среде таких программ как: Mathcad, Matlab, Excel с использованием встроенных в них градиентных методов оптимизации. При этом для получения результата в соответствующие компьютерные модели этой задачи достаточно только подставить исходные данные.

В таблицах 1, 2 содержатся примеры полученных с помощью предложенного метода зависимостей максимальной длины коротких кабельных и воздушных линий от минимально допустимого сечения этих линий.

Таблица 1

**Максимальная длина короткой КЛ 10 кВ с алюминиевыми жилами и бумажной изоляцией в зависимости от сечения линии**

Сечение, мм <sup>2</sup>	Длина, м
16	2377
25	3094
35	3365
50	3950
70	4652
95	5023
120	5338
150	5709
185	6077
240	6539

Таблица 2

**Максимальная длина короткой ВЛ 10 кВ марки АС в зависимости от сечения линии.**

Сечение, мм <sup>2</sup>	Длина, м
25	1971
35	2266
50	2340
70	2354
95	2271
120	2121

Из таблицы 1 видно, что максимальная длина короткой КЛ заданной марки в зависимости от минимально допустимого сечения линии может изменяться от 2,4 до 6,5 км. Как показали исследования, проведенные автором, подобная картина имеет место также для силовых кабелей 10 кВ других марок. Это дает возможность утверждать, что к коротким линиям 10 кВ можно отнести кабельные линии большинства предприятий и районов городов.

В то же время из таблицы 2 видно, что максимальная длина короткой воздушной линии незначительно зависит от ее минимально допустимого сечения и составляет приблизительно 2,2 км.

### Выводы

Предложен метод, с помощью которого можно доказать, что линии проектирующейся системы электроснабжения будут короткими. Метод разрешает сделать это в условиях, когда длины линий, их нагрузка и сечения могут быть неизвестными. Расчеты по этому методу можно легко выполнить в среде таких программ как: Mathcad, Matlab, Excel. Это дает возможность обосновать правомерность использования довольно простых методов оптимального проектирования коротких электросетей [1], которые будут гарантировать оптимальность и допустимость СЭС в целом. Результаты исследований, выполненные автором с использованием предложенного метода, показывают, что большинство кабельных электросетей промышленных предприятий и районов городов относятся к коротким. Поэтому для них целесообразно использовать такие методы проектирования.

В случае, когда с помощью предложенного метода не удастся доказать, что сети СЭС будут короткими, процесс оптимального проектирования таких сетей может значительно усложниться, поскольку существующие методы проектирования в этих условиях не гарантируют достижения оптимума по СЭС в целом.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Камінський А. В. Математичне та комп'ютерне моделювання процесів оптимізації центрування електричних мереж / А. В. Камінський, Б. І. Мокін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 122 с. – ISBN 966-641-139-3.
2. Мокін Б. І. Комп'ютерне моделювання процесу пошуку оптимальних перерізів кабельних ліній / Б. І. Мокін, А. В. Камінський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – №5. – С. 49 – 54.
3. Мокін Б. І. Комп'ютерне моделювання процесів пошуку центру електричної мережі / Б. І. Мокін, А. В. Камінський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – №2. – С. 80-85.
4. Электрические системы и сети / [Буслова Н. В., Винославский В. Н., Денисенко Г. И., Перхач В. С.]; под ред. Г. И. Денисенко. – К.: Вища школа. 1986. – 584 с.
5. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – [6-е изд., перераб. и доп.] – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640 с.
6. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах общего назначения : ГОСТ 13109-97. – [Введ. 2000-01-01]. – ИПК Издательство стандартов, 1998. – 31 с.
7. Козлов В. А. Электроснабжение городов / Козлов В. А. – [Изд. 2-е переработанное] – Л.: Энергия, 1977. – 280 с.
8. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания : ГОСТ 30323-95. – [Введ. 1994-01-01] – ИПК Издательство стандартов, 1994. – 47 с.

**Каминский Андрей Вячеславович** – к. т. н., доцент кафедры моделирования и мониторинга сложных систем, тел.: (0432)-598477.

Винницкий национальный технический университет.