

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПИТАЮЩИХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Короткевич\* М.А.

Повышение надежности и пропускной способности питающих кабельных линий, соединяющих между собой центры питания или центры питания и распределительные пункты городской электрической сети напряжением 6÷20 кВ можно достичь увеличением площади поперечного сечения жил кабелей или прокладкой нескольких параллельных кабелей.

Рассмотрим вначале на основе приведенных затрат целесообразность прокладки параллельных кабелей. Капитальные затраты на сооружение кабельной линии  $K_{к.л}$  состоят из капитальных затрат на приобретение кабеля и линейной арматуры (соединительных и концевых муфт)  $K_k$  и затрат  $K_n$  на прокладку (отрывка земляных траншей, засыпка их дна сеяным песком, укладка кабеля на песчаную подушку, засыпка кабеля сеяным песком, укладка защиты от механических повреждений, засыпка траншеи грунтом, восстановление, если требуется, твердого покрытия улиц или тротуаров, монтаж соединительных и концевых муфт и присоединение последних к электрическим аппаратам) т.е.:

$$K_{к.л} = K_k + K_n = K_k \left(1 + \frac{K_n}{K_k}\right) = K_k (1 + a_1), \quad (1)$$

где  $a_1 > 1,0$  – коэффициент, учитывающий, во сколько раз стоимость прокладки кабеля превышает стоимость самого кабеля; значение  $a_1$  лежит в пределах 4...5 [1, 2].

При прокладке в одной траншее нескольких ( $n$ ) параллельных кабелей с одинаковой площадью поперечного сечения жил капитальные затраты на сооружение кабельных линий можно оценить как:

$$K_{к.л}^n = nK_k + \alpha_1 K_n = K_k (n + \alpha_1 a_1), \quad (2)$$

где  $n$  – число прокладываемых параллельных кабелей;  $\alpha_1 > 1,0$  – коэффициент, учитывающий увеличение стоимости прокладки за счет необходимости укладки  $n$  кабелей на песчаную подушку и монтажа соединительных и концевых муфт на каждом из кабелей.

Увеличение стоимости сооружения в земляной траншее кабельной линии с  $n$  параллельными кабелями по сравнению с прокладкой одиночного кабеля будет равно:

---

\* Белорусский национальный технический университет «БНТУ», Минск, Республика Беларусь, [elsyst@tut.by](mailto:elsyst@tut.by)

$$\frac{K_{к.л}^n}{K_{к.л}} = \frac{n + \alpha_1 a_1}{1 + a_1}. \quad (3)$$

При  $n = 2$ ;  $\alpha_1 = 1,5$ ;  $a_1 = 4$  стоимость кабельной линии напряжением 10 кВ с двумя кабелями в траншее выше стоимости такой же линии с одним кабелем в траншее не в два, а в  $(1,6 \div 1,7)$  раза.

Стоимость сооружения кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией напряжением 20 кВ, выполненных бронированным кабелем с отдельно освинцованными алюминиевыми жилами с алюминиевой оболочкой превышает стоимость сооружения кабельных линий с бронированным кабелем с алюминиевыми жилами и алюминиевой оболочкой в [3]:

- $1,8 \div 2,5$  раза (при напряжении 6 кВ и сечении жил  $50 \div 185 \text{ мм}^2$ );
- $1,5 \div 2,4$  раза (при напряжении 10 кВ и сечении жил  $50 \div 185 \text{ мм}^2$ ).

Годовые эксплуатационные расходы (И), включающие отчисления на амортизацию, капитальный ремонт и обслуживание, определяются долей от капитальных затрат. Так как  $K_{к.л}^n > K_{к.л}$ , то и издержки И будут большими у варианта линии с несколькими параллельными кабелями.

Рассмотрим изменение значения стоимости потерянной электроэнергии при ее передаче по одному или нескольким параллельным кабелям, площади поперечного сечения каждого из которых равны между собой и равны площади поперечного сечения одиночного проложенного кабеля или сумма площадей поперечного сечения  $n$  кабелей ( $n \geq 2$ ) равна площади поперечного сечения одиночного кабеля.

При равенстве площадей поперечного сечения каждого из  $n$  параллельных кабелей площади поперечного сечения одиночного кабеля стоимость потерянной электроэнергии при работающих параллельных кабелях будет в  $n$  раз меньше, т.е.:

$$\frac{\Delta W \beta}{\Delta W^n \beta} = \frac{(3I^2 r_0 \ell \tau \beta)n}{3I^2 r_0 \ell \tau \beta} = n, \text{ или } \Delta W^n \beta = \frac{1}{n} \Delta W \beta, \quad (4)$$

где  $\Delta W$ ,  $\Delta W^n$  – количество теряемой электроэнергии в одном и  $n$  одинаковых кабелях;  $\beta$  – стоимость одного киловатт-часа потерянной электроэнергии;  $I$  – ток нагрузки кабельной линии;  $r_0$  – удельное активное сопротивление одного километра линии;  $\ell$  – длина линии;  $\tau$  – время потерь.

Значение приведенных затрат на передачу электроэнергии представим в виде:

– для линии с одиночным кабелем:

$$З = E_k K_{к.л} + И + \Delta W \beta = (E_k + p_n) K_{к.л} + \Delta W \beta, \quad (5)$$

где  $E_k$  – коэффициент эффективности капитальных вложений; примем равным 0,2;  $p_n$  – доля отчислений от капитальных вложений на амортизацию, ремонты и техническое обслуживание, равен для кабельных линий напряжением 6-10 кВ 0,063 и 0,054 – для кабельных линий напряжением 20 кВ [4, 5];

– для линии с  $n$  параллельными кабелями:

$$Z^n = (E_k + p_n) \left( \frac{n + \alpha_1 a_1}{1 + a_1} \right) K_{к.л} + \frac{1}{n} \Delta W \beta. \quad (6)$$

Из выражения (6) можно определить оптимальное значение количества параллельных кабелей. Для этого возьмем производную  $\frac{dZ^n}{dn}$ , приравняем ее к нулю и получим:

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{\Delta W \beta (1 + a_1)}{(E_k + p_n) K_{к.л}}}. \quad (7)$$

При принятых значениях  $E_k = 0,2$ ;  $p_n = 0,063$ ;  $a_1 = 4$ ;  $\tau = 2500$  ч;  $\beta = 2,5 \cdot 10^2$  у.д.е/кВт·ч, [4].

$$n_{opt} = 4,36 \sqrt{\frac{\Delta W \beta}{K_{к.л}}} = 0,059 I_{доп} \sqrt{\frac{r_0}{K_{к.л}}}. \quad (8)$$

В выражении (8)  $K_{к.л}$  – тыс.у.д.е/км;  $r_0$  – Ом/км.

При современных стоимостях кабельных линий напряжением 6÷10 кВ  $n_{opt} = 1,3 \div 1,5$ , а при напряжении 20 кВ  $n_{opt} < 1,0$ .

Оценим значение приведенных затрат по выражению (5) при современных стоимостях одного километра кабельной линии напряжением 6, 10 и 20 кВ [6] и соответствующих значениях длительно допустимого тока.

С увеличением площади поперечного сечения жил кабеля приведенные затраты возрастают за счет увеличения стоимости кабельной линии и стоимости потерянной электроэнергии (из-за более сильного влияния увеличения значения длительно допустимого тока нагрузки по сравнению со снижением активного сопротивления жил кабеля при увеличении их сечения).

Как показали расчеты, отношение составляющих приведенных затрат  $\frac{\Delta W \beta}{(E_k + p_n) K_{к.л}}$  равно 0,39 – при напряжении линии 6 кВ и 0,33 – при напряжении 10 кВ.

Отношение приведенных затрат  $Z_n$  на сооружение кабельных линий с  $n$  параллельными кабелями к соответствующим затратам  $Z$  дает следующие значения, практически не зависящие от площади поперечного сечения жил кабелей:

$$\frac{Z_n}{Z} = 2,2 \text{ при } n = 2; \quad \frac{Z_n}{Z} = 1,37 \text{ при } n = 4 \text{ и } \frac{Z_n}{Z} = 1,8 \text{ при } n = 6.$$

Установлено, что снижение приведенных затрат при прокладке параллельных кабелей напряжением 6 или 10 кВ по сравнению с прокладкой одиночного кабеля, имеет место лишь в условиях применения существовавших в Советском Союзе стоимостях одного километра кабельных линий и удельных потерь электроэнергии. Здесь оказывается эффективным прокладка от 3 (при напряжении 10 кВ) до 5 (при напряжении

6 кВ) параллельных кабелей.

При современных высоких удельных стоимостях кабельных линий рассмотрение возможности прокладки вместо одного нескольких параллельных кабелей с точки зрения обеспечения минимума приведенных затрат представляется актуальным лишь в условиях применения соответствующего значения стоимости одного киловатт-часа потерянной при передаче электроэнергии.

Если бы параллельные кабельные линии прокладывались по разным трассам, то при принятых исходных данных, значение  $n_{\text{опт}}$ , будет меньше единицы. Это означает, что прокладка более одного кабеля экономически нецелесообразна.

Оценим надежность работы одного километра кабельной линии как вероятность безотказной работы по формуле  $p = e^{-\lambda}$ , где  $\lambda$  – параметр потока отказов кабельных линий, лежит в пределах  $0,02 \div 0,18$  [1]. При указанных значениях  $\lambda$ , вероятность безотказной работы кабельной линии равна  $0,98 \div 0,835$ . Тогда вероятность отказа  $q$  в работе составит  $0,02 \div 0,165$ .

Если параллельно работают 2; 3; 4; 5; 6 кабелей с одинаковой площадью поперечного сечения жил, то максимальное значение вероятности отказа будет соответственно равно  $0,027$ ;  $0,0045$ ;  $0,00074$ ;  $0,00012$ ;  $0,00002$ . Тогда вероятность безотказной работы параллельных кабелей составит соответственно количеству параллельно включенных кабелей, значения:  $0,973$ ;  $0,9955$ ;  $0,99926$ ;  $0,99988$ ;  $0,99998$  2; 3; 4; 5; 6.

Таким образом, вероятность безотказной работы системы передачи электроэнергии при наличии 2; 3; 4; 5 и 6 параллельных кабелей по сравнению с одиночным кабелем возрастает в  $1,16$ ;  $1,19$ ;  $1,196$ ;  $1,197$ ;  $1,2$  раза соответственно, т.е. не более, чем в  $1,2$  раза.

Пропускная способность кабельной линии определяется значением допустимого тока нагрузки, зависящего от допустимой температуры нагрева токопроводящих жил кабеля и, следовательно, их изоляции.

Допустимая температура нагрева токопроводящих жил кабеля определяется конструктивным устройством кабеля (бумажно-масляная, полиэтиленовая или поливинилхлоридная изоляция, медные или алюминиевые жилы, алюминиевая или свинцовая оболочка, наружный покров в виде стальной брони, полиэтиленовой оболочки или выпрессованного поливинилхлоридного шланга), условием прокладки (в земле, в воде, в блоках, на воздухе (в каналах, туннелях, эстакадах, галереях)), количеством параллельно проложенных кабелей (в одной траншее рекомендуется прокладывать не более 6 кабелей) расстоянием между отдельными кабелями в свету, температурой окружающей среды и ее удельными термическими сопротивлениями, глубиной прокладки.

При прокладке в земле нескольких кабелей вводятся поправочные коэффициенты к длительно допустимой мощности, соответствующей условию прокладки в земле одного кабеля [4]:

$$P^{(2)} = 0,9P^{(1)}; P^{(4)} = 0,8P^{(1)}; P^{(6)} = 0,75P^{(1)},$$

где  $P^{(1)}$ ,  $P^{(2)}$ ,  $P^{(4)}$ ,  $P^{(6)}$  – допустимая по условию нагрева мощность, соответствующая прокладке в земле одного кабеля  $P^{(1)}$ , двух  $P^{(2)}$ , четырех  $P^{(4)}$  и шести  $P^{(6)}$  кабелей.

Следовательно, суммарная пропускная способность кабельной линии будет  $1,8P^{(1)}$  – при прокладке двух параллельных кабелей;  $3,2P^{(1)}$  – при прокладке четырех кабелей и  $4,5P^{(1)}$  – при прокладке шести кабелей.

Дадим оценку целесообразности прокладки параллельных кабельных линий на основе метода многоцелевой оптимизации при необходимости обеспечения:

- минимума приведенных затрат (цель 1);
- максимума пропускной способности (цель 2);
- максимума надежности работы (цель 3).

Показатели рассматриваемых целей приведены в табл. 1 применительно к кабельным линиям площадью поперечного сечения жил  $240 \text{ мм}^2$  и номинальном напряжении линии 6 кВ.

Таблица 1 – Показатели целей рассматриваемых вариантов

Но- мер цели	Наименование цели	Едини- цы из- мере- ния	Значения показателей			Относитель- ные значения показателей при прокладке параллельных кабелей коли- чеством			
			для оди- ноч- ного кабе- ля	при прокладке параллельных кабелей в количестве					
				2	4	6	2	4	6
1	Минимум приведенных затрат	тыс. у.д.е.	10,99	11,57	14,95	19,2	1,05	1,36	1,74
2	Максимум пропускной способности	МВ·А	3,80	6,84	12,16	17,1	1,8	3,2	4,5
3	Максимум вероятности безотказной работы	отн. ед.	0,8350	0,973 0	0,999 2	0,999 8	1,16	1,19	1,2

Примем значения показателей целей для одиночного кабеля за единицу. Тогда относительные значения показателей при прокладке параллельных кабелей будут такими, какие указанные в табл. 1.

Тот вариант более целесообразен, который обеспечит наибольшее значение так называемого среднеарифметического критерия оптимизации  $E$ , определяемого как [1].

$$E = \sum_{i=1}^3 u_i e_i \rightarrow \max \quad (9)$$

где  $u_i$  – оценка важности  $i$ -й цели ( $i = 1, 2, 3$ );  $e_i$  – относительная эффективность  $i$ -й цели.

Значение  $\sum_{i=1}^3 u_i = 1,0$ . Предположим, что нижняя оценка важности целей не должна быть меньше 0,2. Тогда максимальное значение оценки важности целей должно быть не более 0,6.

Относительная эффективность целей находится по формулам:

– для минимизируемой цели:

$$e_i = \frac{\min x_i}{x_i}, \quad (10)$$

– для максимизируемой цели:

$$e_i = \frac{x_i}{\max x_i}, \quad (11)$$

где  $x_i$  – относительное значение показателей цели;  $\min x_i$ ,  $\max x_i$  – минимальное и максимальное значения рассматриваемых показателей.

Значения  $e_i$  представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения относительной эффективности целей

Номер цели	Наименование цели	Значения относительной эффективности целей при прокладке кабелей количеством			
		1	2	4	6
1	Минимум приведенных затрат	1,0	0,95	0,73	0,57
2	Максимум пропускной способности	0,22	0,4	0,71	1,0
3	Максимум вероятности безотказной работы	0,83	0,966	0,992	1,0
	$\sum_{i=1}^3 e_i$	2,05	2,32	2,43	2,57

Значения критерия оптимизации приведены в табл. 3.

Таблица 3 Значения критерия оптимизации

Варианты прокладки кабелей, шт.	Значения критерия оптимизации при оценке важности целей			
	$u_1 = u_2 = u_3 = 0,333$	$u_1 = 0,6; u_2 = u_3 = 0,2$	$u_2 = 0,6; u_1 = u_3 = 0,2$	$u_3 = 0,6; u_1 = u_2 = 0,2$
1	0,680	0,810	0,498	0,742
2	0,770	0,840	0,623	0,849
4	0,810	0,778	0,770	0,883
6	0,860	0,742	0,914	0,914

Как видно из данных табл. 3, при одинаковой важности всех целей, значение критерия оптимизации при увеличении количества прокладываемых кабелей возрастает и превышает соответствующее значение при одиночном кабеле более, чем в 1,2 раза в случае параллельной прокладки 4 и более кабелей (при современном значении удельной стоимости кабельной линии). Если наиболее важная цель состоит в обеспечении минимума приведенных затрат, то прокладка параллельных кабелей не представляется целесообразной.

Если более важная цель состоит в обеспечении максимальной пропускной способности кабельной линии, то значение критерия оптимизации при прокладке как двух, так и шести кабелей превышает более, чем в 1,2 раза аналогичное значение критерия оптимизации, определенное для случая прокладки только одного кабеля.

Если наиболее важная цель состоит в обеспечении максимальной

вероятности безотказной работы, то значение критерия оптимизации, определенное только для  $n = 6$  параллельных кабелей, выше более чем в 1,2 раза соответствующего критерия оптимизации характерного для одного прокладываемого кабеля.

### **Заключение**

1. Решение о целесообразности прокладки параллельных кабельных линий должно приниматься на основе метода многоцелевой оптимизации с учетом обеспечения минимума приведенных затрат, максимума пропускной способности и максимума надежности работы.

2. Показано, что в случае, использования только критерия приведенных затрат доказать целесообразность прокладки параллельных кабелей не представляется возможным. Если наиболее важная цель состоит в обеспечении максимальной пропускной способности или надежности питающих линий, то прокладка параллельных кабелей может оказаться эффективной: в первом случае – при количестве кабелей – два и более, во втором – шесть и более.

3. При одинаковой важности всех рассматриваемых целей эффективна прокладка четырех и более параллельных кабелей питающей линии.

### **Литература**

1. Короткевич, М.А. Эксплуатация электрических сетей / М.А. Короткевич. – Минск: Вышэйшая школа, 2014. – 350 с.

2. Майоров, А.В. К обоснованию и выбору параметров кабельных линий 20 кВ в мегаполисе / А.В. Майоров, А.В. Шунтов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 66. Актуальные проблемы надежности систем энергетики. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 125-132.

3. Козлов, В.А. Электроснабжение городов / В.А. Козлов. – Л.: Энергия, 1977. – 280 с.

4. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др.; под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 380 с.

5. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общей редакцией профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др.; гл. ред. А.И. Попов. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 964 с.

6. Справочник по проектированию электрических сетей / И.Г. Карапетян, Д.Л. Файбисович, И.М. Шапиро; под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: ЭНАС, 2005. –