

УДК 621.315.2

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛА ЭКРАНОВ  
ОДНОФАЗНЫХ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО  
ПОЛИЭТИЛЕНА**

**THE EFFICIENCY OF USING THE MATERIAL OF SCREENS OF  
SINGLE-PHASE CABLES WITH CROSS-LINKED POLYETHYLENE  
INSULATION**

М. Э. Высоцкий

Научный руководитель – М. А. Короткевич, д. т. н., профессор  
Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Беларусь

M. Vysotski

Supervisor – M. Karatkevish, Doctor of technical sciences, Professor  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** *одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена изготавливаются с алюминиевой жилой и медным экраном. В статье рассматривается целесообразность применения вместо медного экрана алюминиевого с учетом пропускной способности, массы кабеля, стоимости материала экрана и потерь электроэнергии от индуцированных в экране токов.*

**Abstract:** *single-core cables with cross-linked polyethylene insulation are made with an aluminum core and a copper shield. The article considers the expediency of using an aluminum screen instead of a copper screen, taking into account the bandwidth, cable weight, cost of the screen material and power losses from currents induced in the screen.*

**Ключевые слов:** *одножильный кабель, медный экран, алюминиевый экран, потери электроэнергии.*

**Keywords:** *single-core cable, copper shield, aluminum shield, power loss.*

### **Введение**

Одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена часто изготавливаются с алюминиевой жилой и медным экраном. Но целесообразность использования именно медного экрана неясна. Цель данной работы – оценить целесообразность замены медного экрана на алюминиевый. В данной статье проводятся расчеты для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 10 кВ с площадью поперечного сечения жилы  $S = 95 \dots 1000 \text{ мм}^2$  и экрана  $S_s = 16 \dots 240 \text{ мм}^2$ .

### **Основная часть**

Выбранные площади поперечного сечения экранов силовых кабелей проверяются на термическую стойкость. Для сети с изолированной нейтралью расчетным является случай протекания тока двойного короткого замыкания разогреваемого экран от 80 до 350 °С. Тогда номинальное сечения медного экрана  $F$  определяется по выражению:

$$F = \frac{I_{\text{кз}}^{1,1} \cdot \sqrt{t}}{K}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{кз}}^{1,1} = 0,866 \cdot I_{\text{кз}}^3$  – ток двойного короткого замыкания, кА;

$I_{\text{кз}}^3$  – ток трехфазного короткого замыкания, кА;

$t$  – продолжительность короткого замыкания, с;

$K$  – коэффициент; для меди равный 0,174, для алюминия 0,114 [1].

В табл. 1 представлены значения минимального сечения по термической стойкости для меди и алюминия, округленные до сечений из номинального ряда.

Таблица 1 – Значения минимального сечения экрана по термической стойкости, мм<sup>2</sup>

| Ток 3-фазного КЗ, кА | Продолжительность КЗ, с |           |           |           |
|----------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                      | 0,5                     | 1         | 1,5       | 2         |
| 2                    | 16 / 16                 | 16 / 16   | 16 / 25   | 16 / 25   |
| 4                    | 16 / 25                 | 25 / 35   | 25 / 50   | 35 / 50   |
| 6                    | 25 / 35                 | 35 / 50   | 50 / 70   | 50 / 70   |
| 8                    | 35 / 50                 | 50 / 70   | 50 / 95   | 70 / 95   |
| 10                   | 50 / 70                 | 70 / 95   | 70 / 95   | 95 / 120  |
| 12                   | 50 / 70                 | 70 / 95   | 95 / 120  | 95 / 150  |
| 14                   | 50 / 95                 | 95 / 120  | 95 / 150  | 120 / 185 |
| 16                   | 70 / 95                 | 95 / 150  | 120 / 150 | 120 / 185 |
| 18                   | 70 / 120                | 95 / 150  | 120 / 185 | 150 / 240 |
| 20                   | 95 / 120                | 120 / 185 | 150 / 240 | 150 / 240 |
| 22                   | 95 / 120                | 120 / 185 | 150 / 240 | 185 / 240 |
| 24                   | 95 / 150                | 150 / 185 | 150 / 240 | 185 / 300 |
| 26                   | 95 / 150                | 150 / 240 | 185 / 300 | 185 / 300 |
| 28                   | 120 / 185               | 150 / 240 | 185 / 300 | 240 / 400 |
| 30                   | 120 / 185               | 185 / 240 | 185 / 300 | 240 / 400 |

\* – в числителе при медном экране, в знаменателе при алюминиевом

Из табл. 1 имеем, что при изменении тока КЗ и его продолжительности, сечение алюминиевого экрана относительно медного больше на одну или две ступени из номинального ряда (начиная от тока трехфазного КЗ 2 кА и продолжительности КЗ 1 с). Это условие будет учтено при дальнейшем сравнении характеристик кабелей.

*Влияние замены медного экрана алюминиевым на пропускную способность кабеля.*

Расчеты показывают, что длительно допустимая токовая нагрузка жилы для разных сечений жил и экранов отличается не более чем на 1 %. Соответственно, этим критерием можно пренебречь [2–4].

*Денежные затраты.*

Изготовление кабеля с разным материалом экрана требует различное количество единоразовых капитальных затрат. Потери энергии в экранах кабелей можно привести к денежным единицам, затрачиваемым ежегодно. Таким образом, задачу сравнения данных вариантов можно решить с помощью метода приведенных затрат. Приведенные затраты  $Z$  на 1 километр кабельной линии будут равны:

$$Z = E \cdot K + I, \quad (2)$$

где  $E$  – коэффициент дисконтирования;

$K$  – капитальные затраты на материал экрана кабеля,

$I$  – ежегодные издержки, представляющие собой стоимость потерянной электроэнергии в экранах кабелей.

Оценим, как изменяться потери электроэнергии в кабеле, если использовать алюминиевый экран вместо медного.

Значения потерь энергии в жилах кабеля можно оценить методом времени наибольших потерь по формуле:

$$\Delta W = 3 \cdot I_{\text{нб}}^2 \cdot R_{\text{ж}} \cdot \tau_{\text{max}}, \quad (3)$$

где  $I_{\text{нб}}$  – наибольшая сила тока в жиле (примем 0,9 от длительно допустимого тока кабеля), А;

$R_{\text{ж}}$  – электрическое сопротивление жилы (при температуре жилы 90 °С) Ом/км;

$\tau_{\text{max}}$  – эквивалентное время максимальных потерь, для осветительно-бытовой нагрузки городов 2500 часов в год [5].

Тогда потери в экранах можно определить по формуле:

$$\Delta W_s = \Delta W \cdot \lambda, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – отношение потерь мощности в экране к потерям в жилах кабеля.

Издержки на потери энергии в экранах кабелей вычислим по формуле:

$$I = \Delta W_s \cdot \beta, \quad (5)$$

где  $\beta$  – тариф на электроэнергию в электрической сети, примем 0,24 белорусских рубля.

В табл. 2 представлены средние численные значения соотношения издержек на потери электроэнергии при прокладке треугольником в экране из алюминия  $I_a$  к издержкам на потери в экране из меди  $I_m$  с учетом того, что сечение алюминиевого экрана  $S_a$  на одну или две ступени выше, чем медного  $S_m$ .

Таблица 2 – Отношение издержек на потери электроэнергии в экране из алюминия к издержкам на потери в экране из меди

|             |       |       |       |       |        |        |         |         |         |
|-------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| $S_a / S_m$ | 16/25 | 25/35 | 35/50 | 50/70 | 70/95  | 95/120 | 120/150 | 150/185 | 185/240 |
| $I_a / I_m$ | 0,95  | 0,84  | 0,86  | 0,84  | 0,81   | 0,76   | 0,76    | 0,77    | 0,81    |
| $S_a / S_m$ | 16/35 | 25/50 | 35/70 | 50/95 | 70/120 | 95/150 | 120/185 | 150/240 |         |
| $I_a / I_m$ | 1,32  | 1,19  | 1,17  | 1,10  | 0,99   | 0,92   | 0,90    | 0,92    |         |

Из данных табл. 2 можно увидеть, что при повышении сечения на одну ступень потери энергии в алюминии меньше, а при повешении на две ступени на некоторых сечениях ситуация меняется в обратную сторону.

*Масса кабеля.*

Сравним как изменится масса километра кабеля, если заменить экран из медных проволок на алюминиевые. Удельная масса меди  $\gamma_m=8900 \text{ кг/м}^3$ , алюминия  $\gamma_a = 2700 \text{ кг/м}^3$  полиэтилена  $\gamma_n = 950 \text{ кг/м}^3$ .

Представим массу кабеля  $m_k$  в виде:

$$m_k = m_{ж} + m_{и} + m_{э} + m_{о}, \tag{6}$$

- где  $m_{ж}$  – масса жилы, кг;
- $m_{и}$  – масса изоляции, кг;
- $m_{э}$  – масса экрана, кг;
- $m_{о}$  – масса оболочки, кг.

Подставляя численные значения для разных сечений, получим, если требуется увеличение площади поперечного сечения экрана на одну ступень, то переход с медных на алюминиевые проволоки уменьшает массу кабеля в среднем на 22 %, если на две ступени 14 %.

*Стоимость металла для экрана кабеля.*

Примем стоимость одного килограмма алюминиевой проволоки 9 руб./кг [6], медной 32 руб./кг [7]. В табл. 3 представлены значения массы и стоимость экранов кабелей площадью поперечного сечения  $S_э=16..240 \text{ мм}^2$  на 1 километр длины кабеля.

Таблица 3 – Масса и стоимость экрана на 1 километр длины кабеля

|                     |       |       |       |      |      |       |      |       |        |       |
|---------------------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|
| $S_э, \text{ мм}^2$ | 16    | 25    | 35    | 50   | 70   | 95    | 120  | 150   | 185    | 240   |
| <b>Масса Al, кг</b> | 43,2  | 67,5  | 94,5  | 135  | 189  | 256,5 | 324  | 405   | 499,5  | 648   |
| <b>Масса Cu, кг</b> | 142,4 | 222,5 | 311,5 | 445  | 623  | 845,5 | 1068 | 1335  | 1646,5 | 2136  |
| <b>Цена Al, руб</b> | 389   | 608   | 851   | 1215 | 1701 | 2309  | 2916 | 3645  | 4496   | 5832  |
| <b>Цена Cu, руб</b> | 1282  | 2003  | 2804  | 4005 | 5607 | 7610  | 9612 | 12015 | 14819  | 19224 |

Из табл. 3 можно заметить, что стоимость алюминиевого экрана даже с учетом увеличения площади поперечного сечения на одну и две ступени окажется ниже.

Из табл. 2 и 3 видно, что по отдельным затратам более целесообразно использования алюминиевого экрана. Однако в случаях, когда издержки в медном экране ниже, необходимо дополнительно проанализировать целесообразность его применения. Поскольку требуется сравнение двух

вариантов, где один из них имеет более высокие капитальные вложения, но более низкие затраты, мы можем сравнить их эффективность, определив срок окупаемости  $T_{ок}$  по формуле:

$$T_{ок} = \frac{K_1 - K_2}{I_2 - I_1}, \quad (7)$$

где  $K_1$  – стоимость медного экрана, руб;

$K_2$  – стоимость алюминиевого экрана, руб;

$I_1$  – годовые затраты на потери энергии в алюминиевом экране, руб;

$I_2$  – годовые затраты на потери энергии в медном экране, руб;

Если срок окупаемости  $T_{ок}$  окажется меньше нормативного срока окупаемости  $T_{норм} = \frac{1}{E}$ , то экономичнее окажется вариант с капитальными затратами  $K_1$ . При ставке  $E = 0,095$ ,  $T_{норм} = 10,5$  лет.

В табл. 4 представлены численные значения срока окупаемости для кабелей, у которых издержки с алюминиевым экраном оказались выше, чем с медным. Ячейки, в которых срок окупаемости оказался выше нормативного, выделены полужирным начертанием (использование меди экономичнее).

Таблица 4 – Сроки окупаемости капиталовложений при замене медного экрана алюминиевым

| $S, \text{мм}^2$ | Срок окупаемости, лет, при сечениях экрана $S_a/S_m, \text{мм}^2$ |             |             |           |            |
|------------------|---|-------------|-------------|-----------|------------|
|                  | 16/35   | 25/50       | 35/70       | 50/95     | 70/120     |
| 95               | 7   | <b>14</b>   | <b>14</b>   |           |            |
| 120              | 6   | <b>10,9</b> | <b>10,7</b> | <b>18</b> |            |
| 150              |   | 9           | 9           | <b>15</b> | <b>116</b> |
| 185              |   | 7           | 7           | <b>12</b> | <b>116</b> |
| 240              |   | 6           | 6           | 10        | <b>102</b> |
| 300              |   | 5           | 5           | 9         | <b>337</b> |
| 400              |   |             | 4           | 7         |            |

### Заключение

Замена материала экрана одножильных кабелей с медного на алюминиевый при проверке на термическую устойчивость требует увеличить сечение на одну или две ступени из номинального ряда. Это приводит к следующим последствиям:

- длительно допустимая нагрузка жилы практически не изменяется;
- масса кабеля уменьшается при увеличении сечения экрана на одну ступень из номинального ряда в среднем на 22 % и при увеличении на две ступени на 14 %;
- приведенные затраты при применении экрана из алюминия могут быть как большими, так и меньшими по сравнению с медным экраном.

Таким образом, замена медного экрана на алюминиевый иногда может быть целесообразной для кабелей напряжением 10 кВ.

вариантов, где один из них имеет более высокие капитальные вложения, но более низкие затраты, мы можем сравнить их эффективность, определив срок окупаемости  $T_{ок}$  по формуле:

$$T_{ок} = \frac{K_1 - K_2}{I_2 - I_1}, \quad (7)$$

где  $K_1$  – стоимость медного экрана, руб;

$K_2$  – стоимость алюминиевого экрана, руб;

$I_1$  – годовые затраты на потери энергии в алюминиевом экране, руб;

$I_2$  – годовые затраты на потери энергии в медном экране, руб;

Если срок окупаемости  $T_{ок}$  окажется меньше нормативного срока окупаемости  $T_{норм} = \frac{1}{E}$ , то экономичнее окажется вариант с капитальными затратами  $K_1$ . При ставке  $E = 0,095$ ,  $T_{норм} = 10,5$  лет.

В табл. 4 представлены численные значения срока окупаемости для кабелей, у которых издержки с алюминиевым экраном оказались выше, чем с медным. Ячейки, в которых срок окупаемости оказался выше нормативного, выделены полужирным начертанием (использование меди экономичнее).

Таблица 4 – Сроки окупаемости капиталовложений при замене медного экрана алюминиевым

| $S, мм^2$ | Срок окупаемости, лет, при сечениях экрана $S_a/S_m, мм^2$ |             |             |           |            |
|-----------|--|-------------|-------------|-----------|------------|
|           | 16/35  | 25/50       | 35/70       | 50/95     | 70/120     |
| 95        | 7  | <b>14</b>   | <b>14</b>   |           |            |
| 120       | 6  | <b>10,9</b> | <b>10,7</b> | <b>18</b> |            |
| 150       |  | 9           | 9           | <b>15</b> | <b>116</b> |
| 185       |  | 7           | 7           | <b>12</b> | <b>116</b> |
| 240       |  | 6           | 6           | 10        | <b>102</b> |
| 300       |  | 5           | 5           | 9         | <b>337</b> |
| 400       |  |             | 4           | 7         |            |

### Заключение

Замена материала экрана одножильных кабелей с медного на алюминиевый при проверке на термическую устойчивость требует увеличить сечение на одну или две ступени из номинального ряда. Это приводит к следующим последствиям:

- длительно допустимая нагрузка жилы практически не изменяется;
- масса кабеля уменьшается при увеличении сечения экрана на одну ступень из номинального ряда в среднем на 22 % и при увеличении на две ступени на 14 %;
- приведенные затраты при применении экрана из алюминия могут быть как большими, так и меньшими по сравнению с медным экраном.

Таким образом, замена медного экрана на алюминиевый иногда может быть целесообразной для кабелей напряжением 10 кВ.