

УДК 621.391

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ КАБЕЛЕЙ 110 КВ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ РАЗНЫХ ТИПОРАЗМЕРОВ

Папанцева Е.И., Габриелян Ш.Ж.

ФГБОУ ВПО «Ставропольский государственный аграрный университет»,
Ставрополь, e-mail: e.papantseva@mail.ru

Проведён анализ и сделана оценка влияния конструктивных факторов на параметры маслонаполненных кабелей 110 кВ среднего давления типов МСС и МСА. Для выявления степени этого влияния на параметры кабеля были выполнены расчеты для кабеля сечением 270 мм² без учета спиральности жилы, без градирования изоляции, без экранов, затем выполнялись расчёты с учетом этих факторов. В основу расчета были положены конструктивные данные кабелей и выбраны соответствующие вариации допустимых значений диэлектрической проницаемости и активных потерь слоев изоляции, а также удельной проводимости полупроводящих экранов. Многовариантный расчет первичных и волновых параметров кабелей 110 кВ среднего давления разных типоразмеров имел своей целью не только получение расчетных значений, но и проведение анализа влияния различных конструктивных факторов на параметры кабеля. Результаты расчетов показали, что с увеличением сечения активное сопротивление и индуктивность кабелей уменьшаются, в то время как ёмкость, поперечная проводимость увеличиваются.

Ключевые слова: волновые параметры, маслонаполненные кабели, активное сопротивление кабеля, индуктивность кабеля, ёмкость кабеля, градированная изоляция, экраны на жиле и под оболочкой, спиральности жилы

ASSESSMENT OF INFLUENCE FACTORS ON DESIGN PARAMETERS 110 KV OIL-FILLED CABLES OF DIFFERENT SIZES MEDIUM PRESSURE

Papantseva E.I., Gabrielyan S.Z.

Stavropol State Agrarian University, Stavropol, e-mail: e.papantseva@mail.ru

The analysis and evaluated the influence of structural factors on the parameters maslonapol-nated cables 110 kV medium-pressure type of MCC and MCA. In order to identify the extent of this impact on the cable parameters, calculations were performed for cable of 270 mm² without helicity veins grading without isolation, with no screens, and then perform calculations with these factors. The calculation was based on the design data cables, and selected the appropriate variations of the allowed values of the dielectric constant and loss of active layers of insulation, as well as the conductivity of semiconducting screens. Multivariate calculation of primary and wave parameters of 110 kV cables of different sizes mean pressure was intended to not only to get the calculated values, but also to analyze the impact of various design factors on the parameters of the cable. The calculations showed that an increase in cross-section resistance and inductance of the cable is reduced, while the capacity of the transverse conductivity increases.

Keywords: wave parameters, oil-filled cables, the active resistance of the cable, cable inductance, capacitance cable gradirovannaya insulation, screens and a core shell helicity veins

Коэффициент распространения и волновое сопротивление являются основными характеристиками маслонаполненных кабелей 110 кВ среднего давления, они определяются через первичные параметры кабелей. Для более точного их определения необходимо в расчётах учитывать влияния различных конструктивных факторов. В статье рассматривается расчёт параметров маслонаполненных кабелей 110 кВ среднего давления типов МСС и МСА с сечением жил от 150 до 625 мм².

Разработанные методы расчета волновых параметров высоковольтных кабелей с одно- и двухмодальным распространением волн высокой частоты и практическое применение методов расчетного определения волновых (вторичных) параметров Z_b и δ для трехжильных кабелей с поясной изоляцией 6 кВ типов СБ, АСБ, ААБ и АБ были рассмотрены в статье Папанцевой Е.И. и Габриелян Ш.Ж. [4].

Для кабелей типа МСС и МСА 110 кВ характерна конструкция отдельно изолированной полый жилы, заполненной маловязким маслом под давлением. У рассматриваемых кабелей жилы выполнены из двух концентрических витых слоев медной, отожженной, луженой проволоки фасонного сечения. Например, кабель 110 кВ с сечением жилы 270 мм² имеет внутренний слой двухслойной медной жилы, состоящей из проволок Z-образного сечения, наружный слой – из проволок сегментного сечения. Во внутреннем слое жилы 12 проволок с шагом повива 256 мм в левом направлении; в верхнем слое жила имеет 15 проволок с шагом повива 256 мм в правом направлении. Изоляция градирована, двухслойная. Внутренний слой выполнен из бумаги КВУ-080 с $\epsilon = 4,0-4,3$, внешний – из бумаги КВ-120 с $\epsilon = 3,5-3,7$. На поверхности жилы и оболочки экраны из полупроводящей бумаги КП-080 и КП-120. Толщина экрана

на жиле составляет 0,36 мм, на изоляции – 0,35 мм. Оболочка выполнена из медистого свинца с содержанием меди 0,05–0,08%, толщина оболочки – 3,2 мм [1].

Волновые параметры – коэффициент распространения γ и волновое сопротивление Z_0 – получены ранее [3] через первичные параметры и из решения телеграфных уравнений в виде:

$$\gamma_0 = \alpha_0 + j\beta_0 = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)};$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}.$$

Активное сопротивление кабеля R должно включать в себя сопротивление жилы ($R_{\phi 1} + R_{Z1}$) и оболочки ($R_{\phi 2} + R_{Z2}$), полученные с учетом коэффициентов экранирования металлических экранов (если таковые имеются):

$$L = (L_\phi + L_Z) + (L_{\phi i1} + L_{Zi1})K_{L1} + (L_{\phi i2} + L_{Zi2})K_{L2},$$

где внешняя индуктивность кабеля от циркулярного магнитного потока:

$$L_\phi = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1};$$

внешняя индуктивность кабеля от продольного магнитного потока:

$$L_Z = \frac{\mu\pi}{h^2} \cdot \frac{r_0^2 (r_2^2 - r_1^2)}{r_2^2 - r_1^2 + r_0^2};$$

внутренняя индуктивность жилы:

$$L_{i1} = L_{\phi i1} + L_{Zi1} = \frac{R_{\phi 1} + R_{Z1}}{\omega};$$

внутренняя индуктивность оболочки:

$$L_{i2} = L_{\phi i2} + L_{Zi2} = \frac{R_{\phi 2} + R_{Z2}}{\omega}.$$

Коэффициенты экранирования металлических экранов $K_{R1,2}$ и $K_{L1,2}$ были определены в [5], глубина проникновения поля в жилу (индекс 1), оболочку (индекс 2) и в металлические экраны (индекс Э1 – на жиле, Э2 – под оболочкой) вычисляются:

$$b_{1,2} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma_{1,2}}};$$

$$b_{\text{Э}1,2} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma_{\text{Э}1,2}}}.$$

Емкость кабеля C должна определяться с учетом градирования изоляции и коэффициентов экранирования (K_C) полупроводящих экранов:

$$R = K_{R1} (R_{\phi 1} + R_{Z1}) + (R_{\phi 2} + R_{Z2}) K_{R2},$$

где активное сопротивление жилы определяется с учетом спиральности ее намотки:

$$R_{Z1} + R_{\phi 1} = \frac{1}{\sigma_1 b_1 2\pi r_2} + \frac{2\pi r_1}{\sigma_1 b_1 h^2} \cdot \frac{r_0^2}{r_2^2 - r_1^2 + r_0^2};$$

и активное сопротивление оболочки определяется также с учетом спиральности намотки жилы:

$$R_{Z2} + R_{\phi 2} = \frac{1}{\sigma_2 b_2 2\pi r_2} + \frac{2\pi r_1}{\sigma_2 b_2 h^2} \cdot \frac{r_0^2}{r_2^2 - r_1^2 + r_0^2}.$$

Полная индуктивность кабеля L определяется через внешнюю индуктивность от поперечного и продольного магнитных потоков и внутренние индуктивности жилы и оболочки, полученные с учетом коэффициентов экранирования металлических экранов (если таковые имеются):

$$C = C_u K_C = \frac{2\pi\epsilon_u}{\ln / r_2 r_1} K_C,$$

где эквивалентная диэлектрическая проницаемость градированной изоляции:

$$\epsilon_u = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \ln / r_2 r_1}{\epsilon_1 \ln r_2 / r_1' + \epsilon_2 \ln r_2' / r_1}.$$

Активная поперечная проводимость кабеля G_u с учетом градирования и с учетом коэффициента экранирования полупроводящих экранов K_G :

$$G = G_u K_G,$$

где $G_u = \omega C_u \text{tg} \delta_u = \frac{2\pi\epsilon_u \omega}{\ln / r_2 r_1} \text{tg} \delta_u,$

а тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции должен быть вычислен в соответствии с выражением

$$\text{tg} \delta_u = \frac{\epsilon_2 \text{tg} \delta_1 \ln r_2' / r_1 + \epsilon_1 \text{tg} \delta_2 \ln r_2 / r_2'}{\epsilon_1 \ln r_2 / r_2' + \epsilon_2 \ln r_2' / r_1}.$$

Для расчета первичных и волновых параметров кабелей с одномодальным процессом распространения волн высокой частоты была разработана с участием авторов универсальная программа [2], позволяющая получать результаты с учетом (или без) различных конструктивных особенностей (спиральность жилы, градирование изоляции, металлические и полупроводящие экраны на жиле и под оболочкой).

Многовариантный расчет первичных и волновых параметров кабелей 110 кВ среднего давления разных типоразмеров

имел своей целью не только получение расчетных значений, но и проведение анализа влияния различных конструктивных факторов на параметры кабеля. Поэтому в основу расчета были положены конструктивные данные кабелей и выбраны соответствующие вариации допускаемых значений диэлектрической проницаемости (ϵ) и активных потерь слоев изоляции ($\text{tg}\delta$), а также удельной проводимости полупроводящих экранов (σ_3). Для сравнения степени влияния конструктивных факторов (многопроводочная витая жила, градирующая изоляция, экраны на жиле и под оболочкой) на параметры кабеля были выполнены расчеты для кабеля сечением 270 мм^2 без учета спиральности жилы, без градирования изоляции, без экранов. Далее получены были результаты с учетом отдельных факторов. При расчете были приняты следующие величины:

- удельная проводимость медной жилы $\sigma_M = 5,7 \times 10^7 \text{ См/м}$;
- удельная проводимость свинцовой оболочки $\sigma_{\text{св}} = 0,452 \times 10^7 \text{ См/м}$;
- относительная диэлектрическая проницаемость первого слоя изоляции $\epsilon_1 = 4,1$;
- относительная диэлектрическая проницаемость второго слоя изоляции $\epsilon_2 = 3,7$;
- диэлектрическая проницаемость полупроводящего экрана $\epsilon_3 = 4$;
- тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции первого и второго слоя $\text{tg}\delta_1 = \text{tg}\delta_2 = 0,025$;
- удельная проводимость полупроводящего экрана $\sigma_3 = 5 \times 10^{-5} \text{ См/м}$;
- шаг повива жилы $h = 256 \text{ мм}$.

В таблице приведены результаты расчета параметров кабеля МССК 110 кВ с сечением жилы 270 мм^2 в диапазоне частот 50–500 кГц.

Параметры кабеля МССК 110 кВ среднего давления ($S_H = 270 \text{ мм}^2$)

| f , кГц | R , Ом/км | C , мкФ/км | G , мСм/км | L , мГн/км | Z_0 , Ом | α_0 , дБ/км | β_0 , рад/км |
|---|-------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------------|--------------------|
| Без учета спиральности жилы, градирования изоляции, без экранов | | | | | | | |
| 50 | 0,93 | 0,344 | 2,70 | 0,136 | 19,86 | 0,45 | 2,15 |
| 100 | 1,32 | | 5,40 | 0,135 | 19,80 | 0,78 | 4,28 |
| 150 | 1,62 | | 8,11 | 0,135 | 19,77 | 1,09 | 6,41 |
| 250 | 2,09 | | 13,51 | 0,134 | 19,74 | 1,69 | 10,67 |
| 300 | 2,29 | | 16,22 | 0,134 | 19,73 | 1,98 | 12,80 |
| 350 | 2,47 | | 18,92 | 0,134 | 19,72 | 2,27 | 14,93 |
| 400 | 2,64 | | 21,62 | 0,134 | 19,72 | 2,55 | 17,06 |
| 450 | 2,80 | | 24,32 | 0,134 | 19,71 | 2,83 | 19,18 |
| 500 | 2,95 | | 27,03 | 0,134 | 19,71 | 3,11 | 21,31 |
| С учетом спиральности жилы, градирования изоляции, с полупроводящим экраном на жиле и под оболочкой | | | | | | | |
| 50 | 2,36 | 0,338 | 4,01 | 0,142 | 20,53 | 0,87 | 2,18 |
| 100 | 3,34 | 0,336 | 9,69 | 0,140 | 20,43 | 1,60 | 4,31 |
| 150 | 4,08 | 0,333 | 15,71 | 0,139 | 30,44 | 2,31 | 6,41 |
| 200 | 4,72 | 0,331 | 21,28 | 0,139 | 20,46 | 2,95 | 8,51 |
| 250 | 5,27 | 0,329 | 26,17 | 0,138 | 20,49 | 3,52 | 10,59 |
| 300 | 5,78 | 0,328 | 30,44 | 0,138 | 20,51 | 4,02 | 12,67 |
| 350 | 6,24 | 0,327 | 34,24 | 0,138 | 20,53 | 4,48 | 14,75 |
| 400 | 6,67 | 0,326 | 37,69 | 0,138 | 20,54 | 4,89 | 16,82 |
| 450 | 7,07 | 0,325 | 40,89 | 0,137 | 20,55 | 5,27 | 18,90 |
| 500 | 7,46 | 0,325 | 43,90 | 0,137 | 20,56 | 5,60 | 20,97 |

Сравнение полученных величин показывает, что при учете спиральности жилы активное сопротивление кабеля увеличивается в 2,5 раза, индуктивность увеличивается незначительно на 2–4% за счет увеличения внутренней индуктивности жилы; несколько увеличивается волновое сопротивление (~ на 1,5%). Наблюдается заметное увеличение затухания (рис. 1): в большей степени на низких частотах

(50 кГц – на 40%) и в меньшей степени – на высоких (500 кГц – на 25%). Градирование изоляции, как и следовало ожидать, изменяет емкость кабеля и активную поперечную проводимость. Они уменьшаются примерно на 7%. Волновое сопротивление вследствие этого увеличивается примерно на 3,5% (50 кГц) – 3% (500 кГц). Настолько же уменьшается коэффициент затухания и фазовый коэффициент. Сильное влияние на

параметры кабеля оказывают полупроводящие экраны. Поперечная проводимость увеличивается в 2,4 раза при 50 кГц и в 1,8 раз

при 500 кГц. Коэффициент затухания увеличивается в рассматриваемом диапазоне частот на 16–40%.

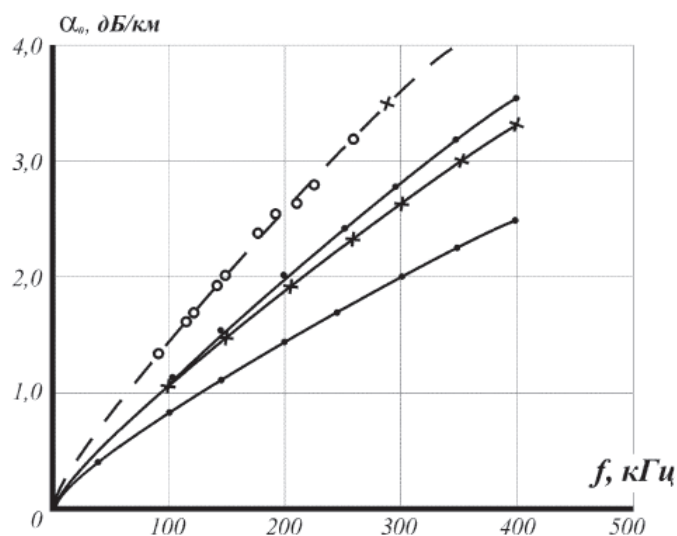


Рис. 1. Расчетные значения коэффициента затухания для кабеля МССК 110 кВ:
 $\sigma_1 = 5,7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$; $\sigma_2 = 0,452 \cdot 10^7 \text{ См/м}$; $\epsilon_1 = 4,1$; $\epsilon_2 = 3,7$; $\text{tg}\delta_1 = \text{tg}\delta_2 = 0,025$;
 $h = 0,256 \text{ м}$; $S_H = 270 \text{ мм}^2$;

- 1 – без спиральности жилы и градирования изоляции, без экрана;
 2 – без учета градирования изоляции; 3 – с учетом спиральности жилы и градирования изоляции; 4 – с полупроводящим экраном

Максимальное значение коэффициента K_G для кабеля МСС наблюдается при $\sigma_3 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ См/м}$ и $10 \cdot 10^{-5} \text{ См/м}$ (рис. 2). Наибольшее влияние полупроводящие экраны оказывают на параметры кабелей типа МСА (Камкабель).

Коэффициент K_G на отдельных частотах достигает величины 3,5. У кабелей типа МСС и МСА металлические экраны накладываются на изоляцию под оболочку и имеют толщину 0,014 мм у МСС и 0,08 мм у МСА.

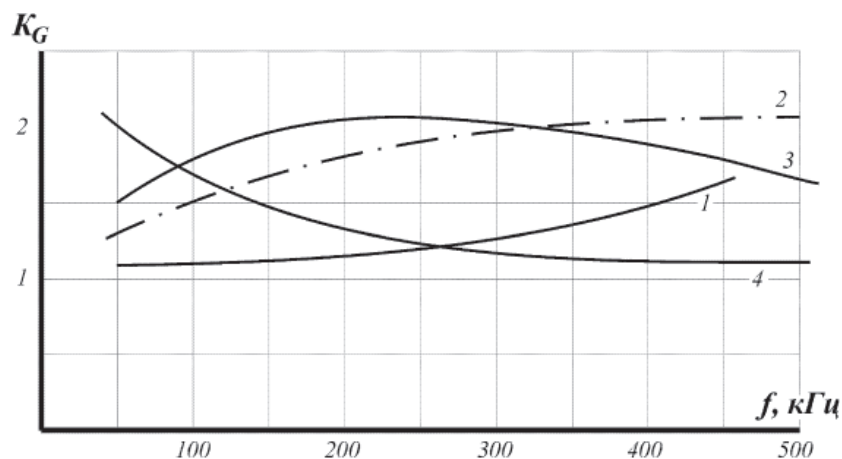


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента экранирования для кабеля МССК при различной проводимости экрана:

- $S_H = 270 \text{ мм}^2$; 1 – $\sigma_3 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ См/м}$; 2 – $\sigma_3 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$; 3 – $\sigma_3 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ См/м}$; 4 – $\sigma_3 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ См/м}$

Анализ показал, что металлические экраны оказывают слабое влияние на параметры кабеля, заметно изменяя лишь его внутреннюю индуктивность. Но величина внутренней индуктивности составляет ~5% от величины внешней индуктивности, по-

этому влиянием металлических экранов в кабелях 110 кВ в конечном счете можно пренебречь. Удельная проводимость металлического экрана в расчетах принималась равной удельной проводимости алюминия $3,5 \cdot 10^7 \text{ См/м}$.

Величина диэлектрической проницаемости изоляции сказывается на величинах емкости, поперечной проводимости, коэффициента затухания, волнового сопротивления и коэффициента фазы. Но влияние ϵ незначительное (в пределах 3–4% в рассматриваемом диапазоне частот).

Величина $\text{tg}\delta$ изоляции сказывается лишь на поперечной проводимости кабеля и величине коэффициента затухания, который может изменяться в зависимости от $\text{tg}\delta$ слоев изоляции в пределах 15–25%, причем на более высоких частотах влияние усиливается.

Результаты расчетов показали, что с увеличением сечения активное сопротивление и индуктивность кабелей уменьшаются, в то время как емкость, поперечная проводимость увеличиваются. Благодаря этому волновое сопротивление у кабелей с большим сечением (625 мм²) значительно меньше (~ на 50%), чем у кабелей с меньшим сечением жилы (150 мм²). При этом фазовые коэффициенты для всех сечений примерно одинаковые. На коэффициент затухания в большей степени влияет материал оболочки. Так, для кабелей с алюминиевой оболочкой (МСА) затухание на частоте 50 кГц имеет величину 0,74 дБ/км, а для кабелей со свинцовой оболочкой – 0,86–0,99 дБ/км.

Список литературы

1. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
2. Габриелян Ш.Ж., Папанцева Е.И., Минаев И.Г. Расчёт первичных и волновых параметров высоковольтных кабелей с использованием программы САВЕЛ // Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве: сб. науч. тр. по материалам 74-й науч.-практ. конф. (г. Ставрополь, 19–23 апреля 2010 г.) / СтГАУ. – Ставрополь, 2010. – С. 37–41.

3. Папанцева Е.И., Габриелян Ш.Ж. Практическая реализация инженерной методики расчёта волновых параметров высоковольтных кабелей // Естественные и технические науки. – 2012. – № 6. – С. 527–529.

4. Папанцева Е.И. Упрощенный метод расчёта параметров высокочастотного тракта, образованного по однородной кабельной линии // Естественные и технические науки. – 2011. – № 1. – С. 173–176.

5. Папанцева Е.И. Передача информации по высоковольтным кабелям // Сельский механизатор. – 2011. – № 4. – С. 32–33.

References

1. Belorussov N.I., Saakjan A.E., Jakovleva A.I. *Jelektricheskie kabeli, provoda i shnury. Spravochnik*. [Electric cables, wires and cords. Directory]. Moskva, Jenergoatomizdat, 1988, 536 p.
2. Gabrieljan Sh. Zh., Papantceva E.I., Minaev I.G. *Sb. nauch. tr. po materialam 74-j nauch.-prakt. konf. «Metody i tehicheskie sredstva povyshenija jeffektivnosti ispol'zovanija jelektrrooborudovanija v promyshlennosti i sel'skom hozjajstve»*, [Proceedings of the materials of the 74-th scientific-practical conference «Methods and technical means to improve the effectiveness of the use of electrical equipment in industry and agriculture»], Stavropol', 2010, pp. 37–41.
3. Papantceva E.I. *Estestvennye i tehicheskie nauki*, 2011, no. 1, pp. 527–529.
4. Papantceva E.I., Gabrieljan Sh.Zh. *Estestvennye i tehicheskie nauki*, 2012, no. 6, pp. 173–176.
5. Papantceva E.I. *Sel'skij mehanizator*, 2011, no. 4, pp. 32–33.

Рецензенты:

Никитенко Г.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой применения электрической энергии в сельском хозяйстве Ставропольского государственного аграрного университета, г. Ставрополь;

Хорольский В.Я., д.т.н., профессор кафедры электроснабжения и эксплуатации электрооборудования Ставропольского государственного аграрного университета, г. Ставрополь.

Работа поступила в редакцию 22.11.2013.