

УДК 622.271.23

Хилов В.С., д-р техн. наук,
Фофанов К.П.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЕМКОСТИ ЖИЛ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ПРИ НАЛИЧИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТОКОПРОВОДА

***Аннотация.** Проанализированы вопросы расчета емкости n -проводной кабельной линии с бронированной оболочкой. Выделены проблемные вопросы определения емкости для кабелей с жилами, расположенными в центре кабеля. Выполнен анализ методов расчета емкостей жил кабельной линии. Проанализированы особенности характера полученных результатов расчетов.*

***Ключевые слова:** зеркальные изображения, емкость проводника, жила кабеля, эквипотенциальная поверхность, потенциальные коэффициенты, емкостные коэффициенты*

Хілов В.С., д-р техн. наук,
Фофанов К.П.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ЄМНОСТІ ЖИЛ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ ЗА НАЯВНОСТІ ЦЕНТРАЛЬНОГО СТРУМОПРОВОДУ

***Анотація.** Проаналізовано питання розрахунку ємності n -провідний кабельної лінії з броньованої оболонкою. Виділено проблемні питання визначення ємності для кабелів з жилами розташованими в центрі кабелю. Виконано аналіз методів розрахунку ємності жил кабельної лінії. Проаналізовано особливості характеру отриманих результатів розрахунків ємності кабелю.*

***Ключові слова:** дзеркальні відображення, ємність провідника, жила кабелю, еквипотенційна поверхня, потенційні коефіцієнти, ємнісні коефіцієнти*

Khiov V.S., PhD,
Fofanov K.P.

FEATURES CALCULATION OF CORE CABLE CAPACITANCES IN THE PRESENCE CENTRAL CURENT CONDUCTOR

***Annotation.** Problems capacitance calculation of n -wired cable line with an armored shell is analyzed. Problematic issues determining the capacity for cables with conductors located in the center of the cable is separated. Studies of calculations cable line capacitances are performed. The features of character result of the calculation of the cable capacitance are analyzed.*

***Keywords:** mirror images, the capacity of the conductor, conductor cables, equipotential surface, potential factors capacitive coefficients*

Постановка вопроса и связь с прикладными задачами. В процессе эксплуатации электроустановок возникает задача контроля сопротивления изоляции питающей сети в реальном времени, что осуществляется путем использования систем контроля токов утечек на землю. Такие системы построены на аналитическом расчете и оценке параметров кабельной сети [1, 2].

В работах [1, 2] анализируются емкости проводников кабеля с бронированной оболочкой. Установлено, что учет наличия центральной жилы кабеля приводит к неопределенности при вычислении полного емкостного сопротивления всего кабеля.

Представляет практический интерес учет смещения центрального проводника относительно оси симметрии токопроводящей оболочки кабеля, т.е. когда они не коаксиальны.

В работе [5] проанализировано и установлено, что наличие центрального проводника приводит к расчетным неоднозначностям.

Для устранения неопределенности и неоднозначности при применении расчетных методов проведем дальнейшие исследования по определению емкостных сопротивлений кабельной линии и наличия центральной токопроводящей жилы.

Анализ исследований и публикаций. В работах [2, 3, 4] оценена возможность использования в информационно-измерительных системах контроля параметров кабельных линий метода зеркальных изображений. В работе [5] были дополнительно проанализированы результаты, полученные в работе [2].

В [4] описана методика нахождения емкости между двумя параллельными проводами, в соответствии с которой расчетную схему двух параллельных проводов можно заменить схемой проводника, размещенного в цилиндре, что, в конечном счете, позволяет разместить один проводник или непосредственно по центру или со смещением и рассчитать емкость в схеме замещения. Такой подход используем для нахождения емкости смещенной центральной жилы. Оценку точности решения произведем по известному точному аналитическому выражению [6].

Постановка задачи исследования. Оценим значение емкости смещенной центральной жилы для кабеля относительно бронированной оболочки.

Основной материал и результаты исследования. В эквивалентной схеме удаляем все проводники кроме проводника, расположенного по центру, рис.1. а.

Погонная емкость между проводником и оболочкой находится по уравнению [4]

$$C_0 = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon / \text{Ln}(k_1 / k_2), \quad (1)$$

где C_0 – емкость на единицу длины, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, k_1, k_2 – значения, определяющие потенциал цилиндра бронированной оболочки.

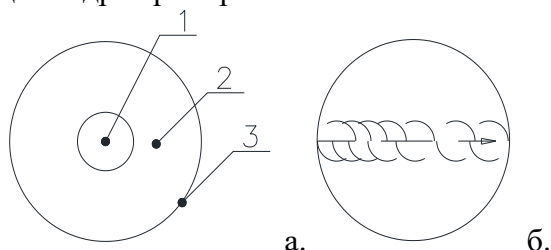


Рис.1. Эквивалентная схема расчета емкости кабеля с бронированной оболочкой (а – коаксиальный кабель, б – схема перемещения центральной жилы): 1– центральный и 3 – внешний проводники, 2 – диэлектрик кабеля

Величину емкости между проводником и оболочкой можно найти также из уравнения [7]

$$C = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot L / \text{Ln}(R_1 / R_2), \quad (2)$$

где C – емкость, ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды, R_1, R_2 – радиус проводящего цилиндра (броня кабеля) и проводника (центральной жилы) соответственно, L – осевая длина образца.

Расчёт по выражению (1) приводит к нахождению натурального логарифма отрицательного числа, что не позволяет определить емкость центральной жилы. С другой стороны, использование выражение (2) позволяет определить искомую емкость.

Проследим зависимость изменения взаимной емкости проводника и бронированной оболочки при изменении положения проводника внутри цилиндрической оболочки. Используем для нахождения этой зависимости аналитическое выражение (1). Для однозначности вычислений принимаем значение абсолютной диэлектрической проницаемости $\epsilon_0 \cdot \epsilon_r = 1$. Тогда для пересчета к действительным значениям кабельной линии, достаточно полученные результаты умножить на реальное значение $\epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ используемого диэлектрика.

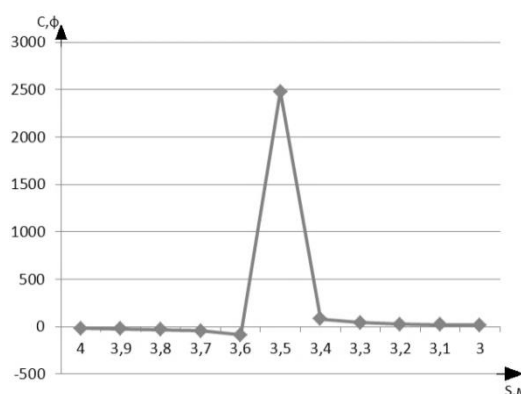


Рис. 2. Зависимость емкости C от расстояния между центрами осей проводника и оболочки кабеля S

Поместим проводник вплотную к стенке цилиндра (рис.1. б), а затем смещаем его с постоянным шагом в 1 мм. В расчетной

схеме (рис.1. б) принят проводящий цилиндр радиусом $R_1=50$ мм и расположенный в нем проводник радиусом $R_2=7$ мм. Расчетный график зависимости емкости C_0 от расстояния между центрами осей проводника и оболочки кабеля S приведен на рис.2. Анализ результатов расчета свидетельствует о том, что взаимная емкость изменяет свое значение от отрицательного значения на положительную величину в промежутке смещения центров осей $S=4-3$ мм.

Изменение знака емкости произошло в районе смещения $S=3,5$ мм, где наблюдается резкий скачок величины емкости в сторону положительного значения с последующим спадом практически до нулевого значения. Такое изменение знака произошло, когда расстояние от центров симметрии внешнего и внутреннего проводников становится меньше радиуса внутреннего проводника.

Проанализируем более подробно емкость центральной жилы в промежутке смещения центров $S=1-0$ мм. Для этого рассчитан график зависимости емкости C_0 от расстояния S , на рис.3.

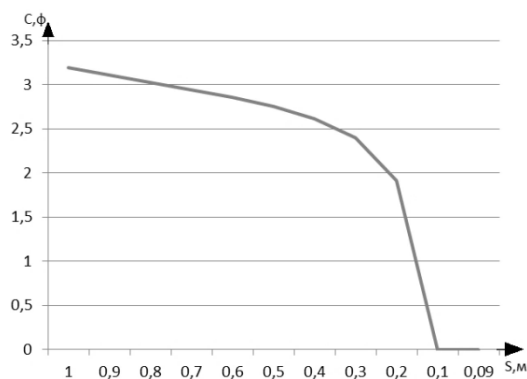


Рис.3. Зависимость емкости C от расстояния между центрами осей проводника и оболочки кабеля S

Как видно из рис. 3, при смещении в пределах $S=1-0$ мм, наблюдается уменьшение емкости, а начиная с значения $S=0,1$ мм значения этой емкости принимают нулевые величины. Применение расчетной формулы (2) для отмеченных значений приводит к отрицательным значениям натурального логарифма.

Проверим полученные результаты методом, приведенным в работе [6]. За

основу принимаем расчетную схему, приведенную на рис.1. а. Согласно работе [6] емкость для исследуемой расчетной схемы находится по соотношению

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot L}{\ln((s_1 + a)(s_2 - a)/(R_1 R_2))}, \quad (3)$$

где $s_1 = 0,5((R_2^2 - R_1^2)/d - d)$, $s_2 = s_2 + d$, $a = \sqrt{s_1^2 - R_1^2}$, d – расстояние между геометрическими осями.

Результаты вычислений приведены на графике рис.4.

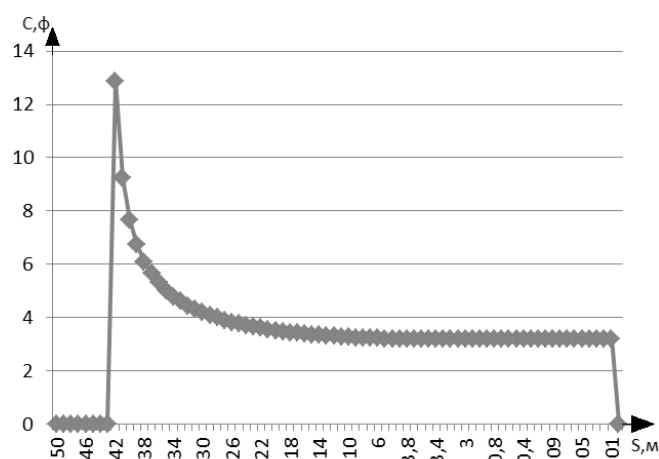


Рис.4. Зависимость емкости C от расстояния между центрами осей проводника и оболочки кабеля S

Из анализа графика рис.4 следует, что с уменьшением расстояния S между геометрическими осями токопроводящей жилы и проводящего цилиндра значение емкости C уменьшается по нелинейной зависимости и в области значений $S=0$ мм стремится к бесконечности. Также в области значений $S=50$ мм (где расстояние от центра симметрии до центра проводника меньше радиуса проводника) значение емкости обнуляется.

Сопоставляя результаты, приведенные на рисунках 1 – 4, наблюдаем отличие конечного результата, а именно емкости C рассчитанной двумя методами (по формулам (1) и (2)) для одной и той же расчетной схемы. При этом общий характер зависимости $C=F(S)$ одинаков. С приближением геометрических осей проводника и проводящего цилиндра друг к другу значение емкости уменьшается.

Однако в первом методе имеет место скачок в положительную сторону с последующим уменьшением. Так же в двух методах при достижении совпадения геометрических осей наблюдается невозможность расчета емкости внутренней жилы кабеля. При этом в первом методе отсутствие результата наблюдается при меньшем смещении осей, чем во втором. Во втором методе получается неопределенность в расчетах, когда тело проводника совпадает с телом проводящего цилиндра, в то время, когда в первом методе имеется возможность рассчитать величину емкости.

Таким образом, результаты, полученные при помощи метода, приведенного в работе [4] позволяют распространить результаты расчета, полученные в работе [5] в части значения взаимной емкости. Расчетные емкости имеют аналогичный характер не только при размещении одного из проводников кабеля непосредственно по центру токопроводящего цилиндра, но и в случае если он будет смещен от центра. Однако при этом часть тела проводника будет пересекать ось симметрии токопроводящего цилиндра. Расчетные схемы, составлены на основании исходных параметров кабельных линий, приведенных в [7–10].

Выводы и направление дальнейших исследований. Полученные результаты подтверждают выводы работы [5], а именно положительные величины емкостных разноименных коэффициентов в методе зеркальных изображений в случае, когда ось симметрии одного из проводников совпадает с осью симметрии токопроводящей цилиндрической оболочки. При несовпадении этих осей, емкостные разноименные коэффициенты отрицательны.

Результаты вычислений распространяются и на случаи кабеля с бронированной оболочкой, когда центр поперечного сечения любой из жил кабеля совпадает с осью симметрии бронированной оболочки (поверхностью равного потенциала).

В дальнейшем исследования будут направлены на определение количественных значений омических сопротивлений утечки

токов на землю в исследуемых кабельных линиях.

Список литературы

1. Хилов В. С. Основні вимоги до безперервного контролю опору ізоляції в мережі з ізолюваною нейтральною напругою до 1000 В та тенденції розвитку таких систем [Текст] / В.С. Хилов, К.П. Фофанов // Форум гірників -2014: матеріали між нар. конф., 1-4 жовт. 2014 р., м. Дніпропетровськ. – Д.: ТОВ «Лізунов Прес». – 2014. – Т.3. – С. 232–237.

2. Хилов В. С. Дослідження можливості використання інформаційно-виміральної системи для визначення складових частин опору ізоляції кабельної мережі [Текст] / В. С. Хилов, К. П. Фофанов // Гірничая електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2015. – №56 – С.67–73.

3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники [Текст] / Л. А. Бессонов – М.: Высшая школа, 1996. – 575 с.

4. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники [Текст] / К. М. Поливанов – М.: «Энергия» – 1969, – Т. 3 – 352 с.

5. Хилов В. С. Дослідження можливості використання методу дзеркальних відображень для визначення ємнісного опору ізоляції кабельної мережі [Текст] / В.С. Хилов, К. П. Фофанов // Форум гірників – 2015: матеріали міжнарод. конф., 30 вересня – 3 жовтня 2015 р., Дніпропетровськ. – Д.: Національний гірничий університет. – 2015. – Т.3. – С. 247–252.

6. Даревский А. И. Теоретические основы электротехники [Текст] / А. И. Даревский, Е. С. Кухаркин. – М.: «Высшая школа». – 1965. – Ч. 2. – 283 с.

7. Алиев И. И. Кабельные изделия. Справочник. [Текст] / И. И. Алиев, С.Б. Казанский. – М.: Раиософт, 2002. – 224 с.

8. Белоруссов Н. И. Электрические кабели, провода, шнуры. [Текст] / Н. И. Белоруссов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 536 с.

9. Веников В. А. Электрические сети [Текст] / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, – 1971. – Ч.2. – 440 с.

10. Сычев Л. И. Шахтные гибкие кабели и электробезопасность сетей [Текст] / Л. И. Сычев, Е.Ф. Цапенко. – М.: Недра, 1978. – 215 с.

Получено 24.04.2016

References

1. Khilov V.S., Fofanov K.P. Osnovni vimogi do bezperernogo kontrolyu oporu izolyatsiyi v merezhi z izolovanoju neytrallyu naprugoyu do 1000 V ta tendentsiyi rozvitku dannih sistem. [Basic requirements for continuous monitoring of the insulation resistance of the network with isolated neutral voltage up to 1000 V, and trends in the development of these systems] (2014) *Forum girnikiv: materiali mizhnarodnoi konferencii, 1-4 zhovtnia*. Dnipropetrovsk, Ukraine, Vol.3, pp. 152-159. (In Ukrainian)

2. Khilov V.S., Fofanov K.P. Doslidzhennya mozhlivosti vikoristannya informatsiyno-vimiryuvalnoyi sistemi dlya viznachennya skladovih chastin oporu izolyatsiyi kabelnoyi merezhi [Study the possibility of the use of information-measuring system for the determination of the components of the insulation resistance of the cable network], (2015), *Girnichia elektromehanika ta avtomatika: Naukovo – tehniczii zbirnik*. Dnipropetrovsk, Ukraine, №56, pp.67–73. (In Russian).

3. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovyi elektrotehniki [Theoretical Foundations of Electrical Engineering], (1996) – Moscow, RF, «Vysshaya shkola», 1996, 575 p. (In Russian).

4. Polivanov K.M. Teoreticheskie osnovyi elektrotehniki. [Theoretical Foundations of Electrical Engineering], (1969) Moscow, RF «Energiya», Vol. 3, 352 p. (In Russian).

5. Khilov V.S., Fofanov K.P. Doslidzhennya mozhlivosti vikoristannya metodu dzerkalnih vidobrazhen dlya viznachennya Emnisnogo oporu izolyatsiyi kabelnoyi merezhi. [Study the possibility of using the method of mirror reflections to determine the capacitance of the cable network isolation.] (2015) *Forum girnikiv: materiali mizhnarodnoi konferencii, 30 veresnia* –

zhovtnia. Dnipropetrovsk, Ukraine, №3, pp. 247–252. (In Ukrainian).

6. Darevskiy A.I., Kuharkin E.S. Teoreticheskie osnovyi elektrotehniki. [Theoretical Foundations of Electrical Engineering] (1965) Moscow, RF, «Vysshaya shkola», Vol. 2, 283 p. (In Russian).

7. Aliev I.I., Kazanskyi S.B. Kabelnyi izdeia. Spravochnik. [Cable products. Directory.] (2002) Moscow, RF, «Radiosoft», 224 p. (In Russian).

8. Belorussov N.I. Elektricheskie kabeli, provoda, shnuri [Electrical cables, wires, cords.] (1987) Moscow, RF, «Energoatomizdat», 440 p. (In Russian)

9. Venikov V.A. Elektricheskie seti [Electrical network] (1971) Moscow, RF, «Vysshaya shkola», Vol. 2, 283 p. (In Russian).

10. Syichev L.I., Tsapenko E.F. Shahtnyie gibkie kabeli i elektrobezopasnost setey [Mining flexible cables and electrical safety of networks] (1978) Moscow, RF, «Nedra», 215 p. (In Russian).



Хилов Виктор Сергеевич, д. т. н., проф. Каф. метрологии и информационно-измерительных технологий ГБУЗ «НГУ». Днепропетровск, пр. К.Маркса, 19; т. (056) 3730746 e-mail: khilov53@ukr.net.



Фофанов Константин Петрович, магистр, инженер 374 отд. Государственного предприятия СКБ «Южное». Днепропетровск, ул. Криворожская, 3; т. (050) 5277065; e-mail: indigo.kf@ukr.net