

УДК 621.3

## НЕКОТОРЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Фирсов Э. А.

Научный руководитель – ст. преп. Колосова И. В.

Электромагнитные экраны предназначены для локализации в некотором объеме пространства полей, создаваемых излучателями электромагнитной энергии, для ослабления или исключения воздействия излучателей на другое электрооборудование. В зависимости от назначения, различают экраны с внутренним возбуждением электромагнитного поля, в которых помещается источник помех, и экраны внешнего электромагнитного поля, во внутренней полости которых помещаются чувствительные к этим полям устройства. В первом случае экран предназначен для локализации поля в некотором объеме, во втором – для защиты от воздействия внешних помех.

Экранирование как техническое мероприятие призвано обеспечить надежность работы электрического устройства (ЭУ): подавить до требуемого уровня влияние непреднамеренных излучений электромагнитной энергии, препятствующих эффективному функционированию элементов ЭУ.

Определение назначения экрана в каждом отдельном случае производится с учетом характера источника помех и чувствительных к ним элементов, их размеров, пространственного размещения, вида подводимых коммуникаций и допустимой величины воздействия экрана на экранируемые элементы.

Для оценки функциональных качеств экрана могут быть использованы различные характеристики. Наиболее обобщенной является эффективность экранирования (ЭЭ) [1], которая определяется по формуле (1), и под которой понимают отношение напряжений ( $U$ ), токов ( $I$ ), напряженностей электрического ( $E$ ) и магнитного ( $H$ ) полей в данной точке при отсутствии (без штриха) и наличии (со штрихом) экрана

$$\mathcal{E} = \frac{U}{U'} = \frac{I}{I'} = \frac{E}{E'} = \frac{H}{H'}. \quad (1)$$

Длительное время в технике электромагнитного экранирования применялись лишь так называемые «традиционные» материалы – металлические листы. Это объясняется главным образом тем, что их высокая проводимость обеспечивает быстрое затухание электромагнитной энергии в толще металла, а большая разница между поверхностным сопротивлением металла и полным сопротивлением падающей волны приводит к значительным отражениям радиоволн от поверхности экрана. В результате металлический лист незначительной толщины обладает высокой ЭЭ. Однако практика экранирования показывает, что чрезвычайно большие эффективности самого металла фактически реализуются лишь на 10...20 %, поскольку основным фактором здесь является качество конструкции. Поэтому во многих случаях

оказывается возможным заменить металлический экран экраном из другого материала, собственная способность которого к экранированию электромагнитных полей может и не быть очень высокой, но решающего задачи обеспечения мобильности конструкции, упрощения ее сборки и т. д., которые позволяют обеспечить требуемую эффективность.

Для экранирования в настоящее время используются металлические листы, сеточные материалы, фольговые материалы, токопроводящие краски, металлизация поверхностей, стекла с токопроводящим покрытием, специальные ткани, радиопоглощающие материалы, проводящие пластмассы, электропроводный клей.

Паразитная наводка — это передача напряжения из одного изделия или его части в другое, не предусмотренная его схемой и конструкцией. Такая наводка возникает вследствие паразитной связи между ними, связи по электрическим цепям, появляющимся в устройстве независимо от желания конструктора. Между двумя электрическими цепями, находящимися на некотором расстоянии друг от друга, могут возникать электромагнитные связи через: электрическое поле; магнитное поле; электромагнитное поле; провода и волноводы, соединяющие эти цепи. Подавление паразитных наводок сводится к устранению или ослаблению до допустимых величин паразитных связей между источниками и приемниками наводок. При недостаточности всех этих мер приходится прибегать к экранированию.

Итак, в первом случае (рисунок 1) пусть имеются точки А и В, относящиеся к источнику (с ЭДС, равной  $E_{ист}$ ) и приемнику наводки соответственно. Точка В связана с корпусом только емкостью  $C_B$ .

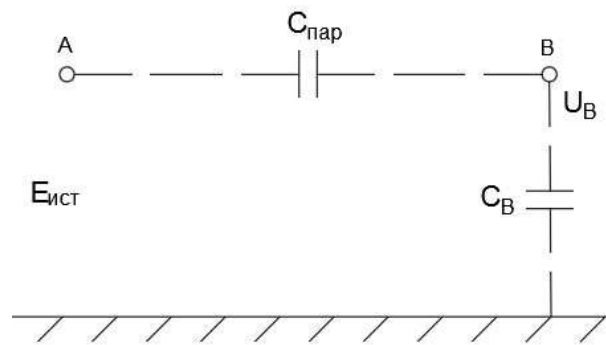


Рисунок 1 – Случай без применения экрана

Для последовательного соединения емкостей имеем

$$C \cdot E_{ист} = C_B \cdot U_B, \quad (2)$$

где  $C$  – полная ёмкость, равная

$$C = \left( \frac{1}{C_{пар}} + \frac{1}{C_B} \right)^{-1} = \frac{C_B \cdot C_{пар}}{C_B + C_{пар}}, \quad (3)$$

где  $C_{пар}$  – паразитная ёмкость.

Тогда напряжение, наведенное на приемник без экрана, находится по следующей формуле

$$U_B = \frac{C_{\text{пар}}}{C_B + C_{\text{пар}}} \cdot E_{\text{ист}}. \quad (4)$$

Во втором случае (рисунок 2) имеется экранирующий лист (Э), который разделяет ёмкость  $C_{\text{пар}}$  на две последовательно соединенные ёмкости  $C_1$  и  $C_2$ , к которым присоединена параллельно небольшая остаточная ёмкость  $C'_{\text{пар}}$ . Для получения напряжения  $U_B$  можно, пренебрегая ёмкостью  $C'_{\text{пар}}$ , считать, что напряжение в точке В определяется напряжением на экране  $U_{\text{Э}}$ , который в этом случае заменяет точку А на рисунке 1. Тогда напряжение  $U_B$  для рисунка 2 равняется

$$U_B = U_{\text{Э}} \cdot \frac{C_2}{C_B + C_2}. \quad (5)$$

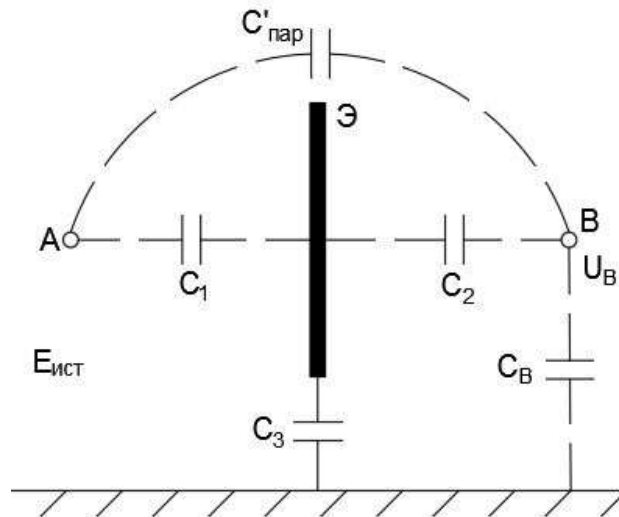


Рисунок 2 – Случай с применением экрана

Напряжение на экране, с учетом тех же соображений и емкости  $C_3$  между экраном и корпусом, будет равно

$$U_{\text{Э}} = E_{\text{ист}} \cdot \frac{C_1}{C_3 + C_1}. \quad (6)$$

В итоге напряжение в точке В после установки экрана вычисляется как

$$U_B = E_{\text{ист}} \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{(C_3 + C_1) \cdot (C_B + C_2)}. \quad (7)$$

Это напряжение после установки экрана может оказаться как выше, так и ниже, чем до его установки. Рассмотрим эти возможные случаи, почему так происходит:

1. если экран установлен так, что его ёмкость относительно точки А велика, а относительно корпуса мала, т. е. если  $C_1$  значительно больше  $C_3$ , то напряжение на экране будет примерно равно напряжению в точке А. В результате, так как ёмкость  $C_2$  всегда больше  $C_{пар}$ , напряжение  $U_B$  после установки экрана будет выше, чем до установки, и экран оказывается не полезным, а вредным;

2. если экран установлен так, что ёмкость  $C_3$  велика, то напряжение при наличии экрана будет меньше, чем без него.

Таким образом с увеличением  $C_3$  экранирование становится более эффективным.

Теоретически, без учёта ёмкости  $C'_{пар}$ , сделав короткое замыкание между экраном и корпусом (рисунок 3) ёмкость  $C_3$  увеличится до  $\infty$ , следовательно,  $U_B$  станет равным нулю, что даёт идеальный экранирующий эффект. В действительности  $U_B$  не будет строго равно нулю, однако его значение будет невелико.

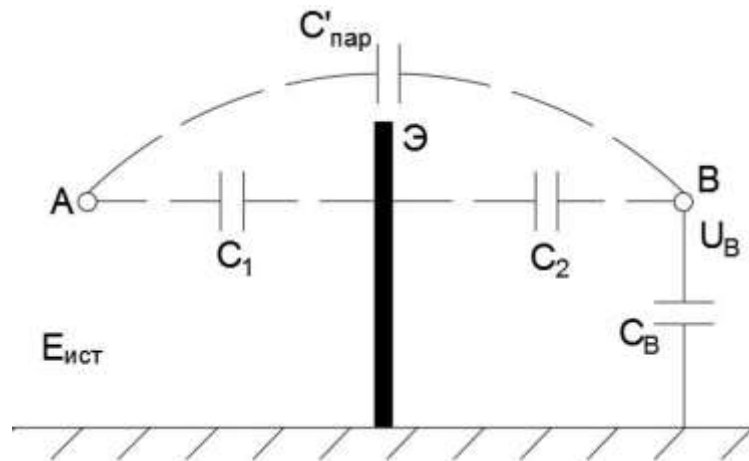


Рисунок 3 – Иллюстрация соединения экрана с корпусом прибора

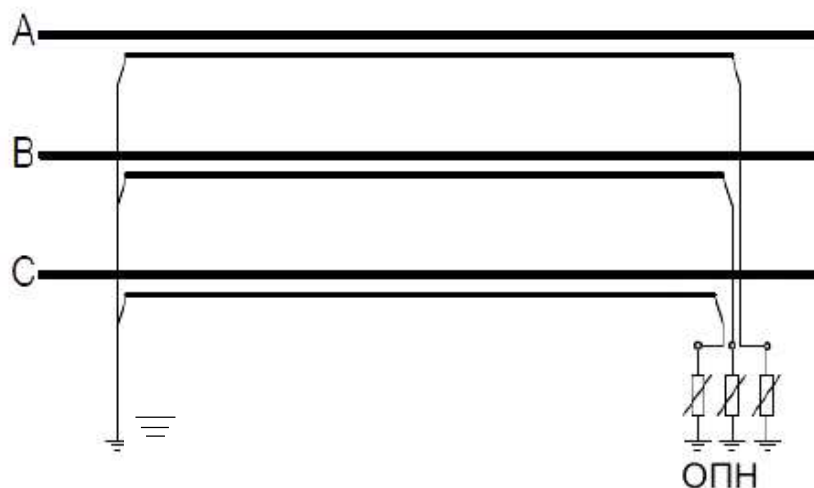
Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (КСПЭ) в своей конструкции имеют металлический экран. Одной из основных его функций является выравнивание электрического поля внутри кабеля, вызывающего старение полимерной фазной изоляции [2]. Однако выравнивание поля возможно только при заземлении экрана.

Основные способы заземления экранов [3]:

а) заземление с одного конца КСПЭ (одностороннее заземление) – рисунок 4;

б) заземление с двух концов КСПЭ (двустороннее заземление) – рисунок 5;

в) заземление с двух концов КСПЭ с использованием полного цикла транспозиции – рисунок 6. Транспозиция экранов кабельной линии, проложенной в грунте, выполняется в коробках транспозиции, размещаемых в колодцах транспозиции.



ОПН – ограничитель перенапряжения  
Рисунок 4 – Одностороннее заземление

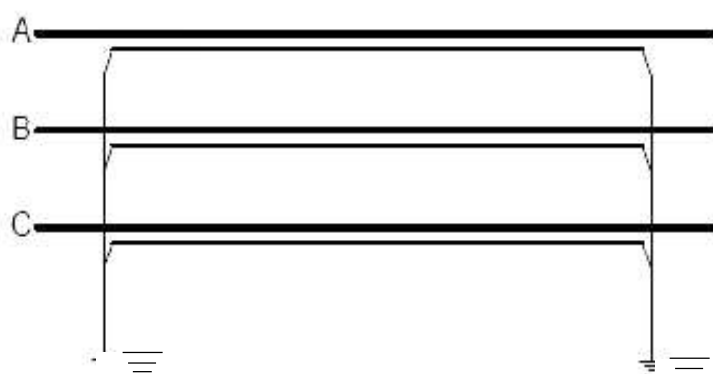


Рисунок 5 – Двустороннее заземление

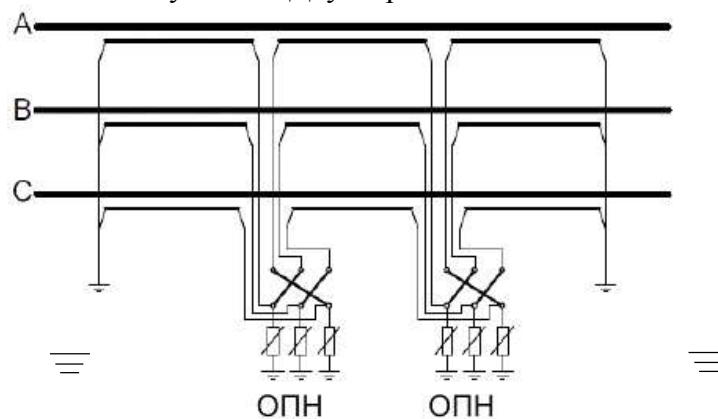


Рисунок 6 – Заземления экранов с полным циклом транспозиции

При одностороннем заземлении экрана отсутствуют продольные токи (так как «экран электрически разорван»). Незначительные потери в экране обусловлены только вихревыми токами, которые на тепловой режим эксплуатации КСПЭ не влияют.

В зависимости от конструкции КСПЭ бывают однофазными или трехфазными. Особенность однофазного кабеля, имеющего заземленный медный экран – отсутствие за его пределами электрического поля, но наличие магнитного. Магнитные поля трех однофазных кабелей, входящих в трехфазную группу, в нормальном режиме дают наводки на контуры, образованные тремя экранами. При двустороннем заземлении экранов эти

контуры получаются замкнутыми, и наведенное напряжение вызывает появление в экранах кабеля продольных токов промышленной частоты, приводящих к нагреву экранов одновременно по всей длине линии, повышающих температуру изоляции и снижающих допустимый ток кабеля. Для минимизации токов и потерь в экранах следует [4]:

- прокладывать кабели сомкнутым треугольником (снижается площадь контуров и поэтому уменьшается наводка);
- применять кабели с малым сечением экрана (растет сопротивление контуров, что обуславливает снижение их тока и потерь).

Как видно из вышесказанного, величина сечения экрана принципиальна в вопросах потерь активной мощности в кабеле в нормальном режиме, а значит – напрямую определяет эффективность однофазных кабелей в электрических сетях. Кабели с малым сечением экрана используются редко, т. к. необходимо избегать перегрева экрана током короткого замыкания, который в случае повреждения главной изоляции кабеля попадает в экран и проходит по нему до мест заземления (рисунок 7).

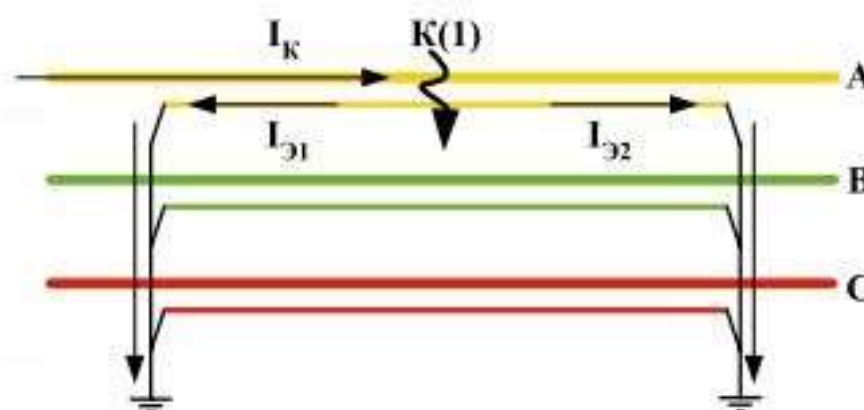


Рисунок 7 – Токи в заземленных по концам экранах однофазных кабелей при однофазном повреждении К(1)

Существуют разные конструкции трехфазных кабелей. В настоящее время чаще встречаются кабели с пофазно экранированными жилами, также у них может быть общий экран или броня.

Применение КСПЭ 6 – 500 кВ является обоснованным с точки зрения высоких эксплуатационных характеристик (возможность работать при повышенных температурах, отсутствие ограничения на перепад высот по трассе кабельной линии и др.) и, в сравнении с кабелями с бумажной пропитанной изоляцией, меньшей пожарной опасности (поскольку применяются кабели, не распространяющие горение), обеспечивающих высокий уровень надёжности для потребителей [5].

#### Литература

1. Винников В. В. Основы проектирования РЭС. Электромагнитная совместимость и конструирование экранов: Учеб. Пособие – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006. – 164 с.
2. Алехнович, Д. С., Угаров, М. С. Выбор экранов кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / Д. С. Алехнович, М. С. Угаров // Актуальные проблемы энергетики – 2016:

материалы научно – технической конференции студентов и аспирантов, Минск / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 190 – 194.

3. ТКП 611 - 2017 (33240). Силовые кабельные линии напряжением 6 - 110 кВ. Нормы проектирования по прокладке кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена пероксидной сшивки. - Минск: "Информационно-издательский центр" ОАО "Экономэнергo", 2017. - 160 с.

4. Дмитриев, М. В. Однофазные и трёхфазные кабели 6-35 кВ: различия при выборе сечения экранов и схемы их заземления / М. В. Дмитриев // Энергоэксперт. – 2017. – №1. – С. 49 – 53.

5. Дмитриев, М. В. Особенности применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / М. В. Дмитриев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2015. – №3 (30). – С. 62 – 67.