

**УДК 621.315.23.027.3**

И.К.ФАСТ, студент гр. Э-11 (АлтГТУ)  
Научный руководитель А.А. ГРИБАНОВ, к.т.н., доцент (АлтГТУ)  
г. Барнаул

## **УМЕНЬШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНИИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ЗАЩИТЕ ЕЕ ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Наиболее оптимальным методом передачи электроэнергии в городских условиях являются подземные высоковольтные кабели. Экономический фактор имеет большое значение, поскольку для прокладки кабельной линии требуется меньше земельных участков, особенно в жилых зонах. Кроме того, в последние годы вопрос электромагнитной безопасности стал актуальным. Этот аспект изучается Всемирной организацией здравоохранения в рамках "Международного проекта EMF".

Магнитное поле воздушной линии электропередачи с напряжением 110 кВ превышает установленные нормы для близлежащих жилых зон. Это вызывает ситуацию, когда в высотных зданиях уровень магнитного поля оказывается слишком высоким. Что касается кабельной линии, то ее магнитное поле может превышать допустимые значения только в квартирах на первом этаже. В области, где находятся кабели, уровень магнитного поля также может быть выше предельно допустимого для жилых районов. Наибольшее значение магнитного поля фиксируется в местах соединения кабелей, где расстояние между ними составляет 0,5 м. Обычно высоковольтная кабельная линия состоит из трех одножильных кабелей, выполненных из сшитого полиэтилена.

На рис. 1 показаны основные элементы силового кабеля напряжением 110 кВ. Существует несколько типов склеивания, но наиболее популярными являются одноточечное, перекрестное и сплошное склеивание. Одноточечное и перекрестное соединения не позволяют защитным токам циркулировать, что предотвращает дополнительный нагрев кабелей и способствует максимальной пропускной способности кабельных линий. Однако такие системы требуют установки дополнительных защитных устройств. В отличие от них, кабельные системы со сплошным соединением не имеют этой проблемы, но сталкиваются с другой: тепловое воздействие защитных токов может уменьшить пропускную способность кабельной линии.

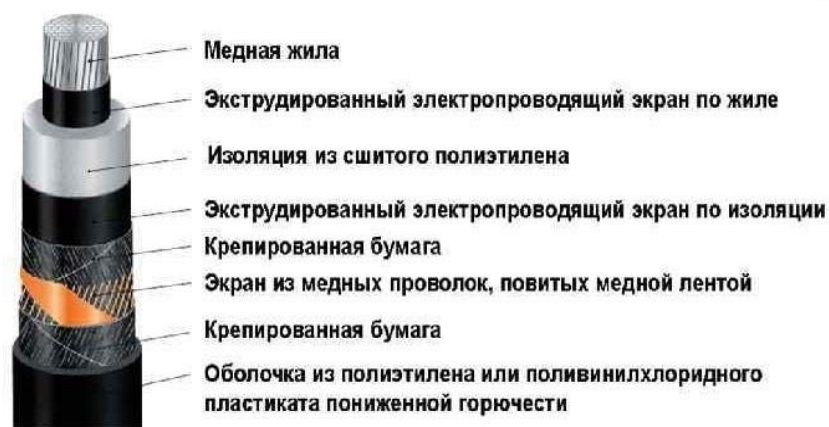


Рис. 1 – Кабель СПЭ

С другой стороны, магнитное поле, возникающее из-за индуцированных токов, снижает общее магнитное поле кабельной линии. Влияние данного метода на пропускную способность кабеля еще не было изучено. Альтернативным способом уменьшения магнитного поля в кабельной системе с одноточечными или перекрестными соединениями является использование дополнительных экранов. Для изоляции кабельных линий обычно используется электромагнитные экраны из алюминия и магнитные экраны с высоким значением магнитной проницаемости. Эти экраны могут иметь плоскую, U-образную или H-образную форму и предназначены для изоляции кабельной линии. Важно отметить, что при отсутствии потерь на гистерезис магнитные экраны не генерируют тепло. Тепловыделение от Джоулева нагрева электромагнитных экранов в кабельной линии незначительно, поскольку экран расположен на расстоянии 200 мм от силового кабеля.

Следовательно, применение электромагнитных и магнитных экранов не сказывается на пропускной способности кабельных линий. Однако следует отметить два существенных недостатка таких экранов: значительный расход металла при их изготовлении, прочная и жесткая конструкция, которая усложняет доступ к кабелям. Экраны, созданные на основе пассивных контуров, лишены этих недостатков. Существуют экраны с одним, двумя и несколькими контурами. Одноконтурный экран с асимметричной магнитной связью эффективно уменьшает магнитное поле в области соединения кабелей, не влияя на их пропускную способность. Однако вопрос о тепловом воздействии одноконтурного экрана на длинные участки кабельной линии остается неразрешенным. Настоящая статья посвящена исследованию эффективности методов экранирования от магнитного поля для повышения пропускной способности кабельных линий.

В данной работе исследуется влияние асимметричной магнитной связи, далее именуемой пассивным контуром, на пропускную способность кабельной системы. Для этого проводится сравнительный анализ между кабельной системой с одноточечным соединением и ситуацией, в которой пропускная способность снижается под воздействием теплового излучения от соседних экранирующих проводников. К таким проводникам могут относиться экраны кабелей (при надежном соединении) или проводники пассивного контура, пересекающие кабельную линию. Оценка пропускной способности кабельной линии осуществляется с использованием как традиционных методов, так и стандарта IEC 60287 "Электрические кабели – расчет номинального тока", а также численного моделирования.

Стандарт IEC 60287 предоставляет возможность вычислить пропускную способность кабельной линии как при одноточечном, так и при сплошном соединении системы. Мы анализируем пропускную способность кабельной линии с напряжением 110 кВ для двух различных типов размеров проводов. В рамках исследования также анализируются два варианта сечения экрана кабеля и два варианта расстояния между кабелями. Параметры кабельной линии и окружающая среда характеризуются следующими параметрами:

- коэффициент нагрузки составляет 100%;
- кабельная линия представляет собой плоскую конструкцию, кабели которой проложены на глубине 1,5 метра;
- расстояние между осями соседних силовых кабелей (интервал между кабелями) равно двум или четырём диаметрам кабеля;
- тепловое сопротивление грунта принимает значения от 0,6 м·К/Вт до 1,2 м·К/Вт с шагом 0,2 м·К/Вт, а в крайнем случае - 3,0 м·К/Вт;
- температура на поверхности земли составляет  $T=20^{\circ}\text{C}$ .

Мы рассматриваем силовую кабель в виде цилиндрического проводника, который состоит из трех слоев: изоляции из сшитого полиэтилена, экрана и внешней оболочки. Параметры одножильных силовых кабелей, рассчитанных на напряжение 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, следующие:

- размер жилы составляет 240 мм<sup>2</sup> или 500 мм<sup>2</sup>;
- жила сделана из алюминия;
- максимальная рабочая температура жилы достигает 90°C;
- толщина изоляции кабеля равна 16 мм;
- удельное тепловое сопротивление изоляции кабеля составляет 3,5 м·К/Вт;
- размер экрана достигает 100 мм<sup>2</sup> или 200 мм<sup>2</sup>;
- толщина оболочки (ПВХ-изоляция) составляет 4,0 мм;
- тепловое сопротивление оболочки составляет 6,0 м·К/Вт.

Согласно подразделу 1.4.1.1 стандарта МЭК 60287-1-1, допустимый номинальный ток определяется с использованием следующего уравнения:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d[0,5T_1 + m(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + mR(1 + \lambda_1)T_2 + mR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}}, (1)$$

где  $\Delta\theta$  – разрешенное увеличение температуры проводника по сравнению с температурой окружающей среды  $\theta_a$ ;  $R$  – сопротивление проводника переменному току при достижении его максимальной рабочей температуры  $\Omega/m$ ;  $W_d$  – диэлектрические потери на единицу длины в каждой фазе;  $T_1$  – тепловое сопротивление на единицу длины между проводником и экраном;  $T_2$  – тепловое сопротивление между экраном и броней;  $T_3$  – тепловое сопротивление оболочки кабеля;  $T_4$  – тепловое сопротивление между поверхностью кабеля и грунтом;  $m=1$  – число проводников в кабеле;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – это отношение общих потерь в экране и броне соответственно к общим потерям в проводниках.

Так как анализируемые силовые кабели не оснащены броней, значения параметров  $T_2$  и  $\lambda_2$  равны нулю. Мы определяем параметры  $T_1$ ,  $T_3$  и  $T_4$ , опираясь на данные подразделы 2.1.1, 2.1.3 и 2.2.3.2.2. стандарта IEC 60287-2-1.

#### Список литературы:

1. 1. Шульга, Р. Н. Электромагнитные поля и их экранирование / Р. Н. Шульга // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 12. – С. 29-40. – EDN RZEUH.
2. Lobanov, A. V. Numerical solution of shielding problem for 3D model of electrostatics in the presence of anisotropic layer / A. V. Lobanov // Far Eastern Mathematical Journal. – 2022. – Vol. 22, No. 2. – P. 195-200. – DOI 10.47910/FEMJ202225. – EDN QURUKE.
3. Кечиев, Л. Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л. Н. Кечиев, Б. Б. Акбашев, П. В. Степанов ; Л. Н. Кечиев, Б. Б. Акбашев, П. В. Степанов. – Москва : Группа ИДТ, 2010. – 469 с. – (Серия "Библиотека ЭМС"). – ISBN 978-5-94833-096-9. – EDN QMUTMZ.
4. Дубицкий, С. Д. Управление магнитным полем подземной кабельной линии электропередач / С. Д. Дубицкий, Г. В. Грешняков, Н. В. Коровкин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 88-100. – EDN ZSUMBN.

Информация об авторах:

Фаст Иван Константинович, студент гр. Э-11, АлтГТУ, 656038,  
г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46, e-mail: [ivan.fast.030@mail.ru](mailto:ivan.fast.030@mail.ru)

Грибанов Алексей Александрович, к.т.н., доцент, АлтГТУ, 656038,  
г. Барнаул, проспект Ленина, д. 46, [gribanova@altgtu.ru](mailto:gribanova@altgtu.ru)