

## Анализ влияния высших гармонических составляющих на безотказность электроизоляционных покрытий

**Шпиганович Александр Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
**Довженко Сергей Викторович,**  
аспирант.

*Липецкий государственный технический университет.*

Электрохимический пробой изоляции происходит по причине протекания химических реакций в изоляционном слое, скорость которых увеличивается при подведении дополнительной тепловой энергии. Отказ, вызванный изменением ресурса изоляции, относят к постепенным [1]. Существующие методики расчета [2] [3] [4] не учитывают особенности геометрии проводников и изоляции, что приводит к значительным погрешностям при определении параметров безотказности.

В токоведущих элементах линий электропередачи из-за наличия активного сопротивления происходят потери энергии, которая рассеивается в виде тепла [5]. Предлагается дополнительно учитывать увеличение сопротивления каждой фазы кабельной линии электропередачи с учетом скин-эффекта.

$$\Delta_{sev} = c \sqrt{\frac{2\varepsilon_0}{2\pi f v}} r_0 ; \quad (1)$$

$$s_{kv} = \pi \left[ r^2 - \Delta_{se}^2 0,5 \left( \frac{r - \Delta_{se}}{|r - \Delta_{se}|} + 1 \right) \right]; \quad (2)$$

$$K_v = \frac{r_0 l s}{s_k r_0 l} = \frac{s}{s_{kv}}, \quad (3)$$

[6]

где  $\Delta_{sev}$  - толщина токопроводящего слоя, мм;  $c$  – скорость света в вакууме,  $3 \cdot 10^8$ , м/с;  $f$  – частота сети, Гц;  $r_0$  – удельное сопротивление проводникового материала;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ , Кл<sup>2</sup>/(Нм<sup>2</sup>);  $v$  - номер гармоники;  $s$  – площадь поперечного сечения проводника;  $K_v$  - коэффициент увеличения сопротивления на  $v$ -той гармонике.

С учетом (1)-(3) определяется значение тепловой мощности, выделяющейся в материале проводника и изоляционном материале соответственно

$$Q = R_{np} (I_1^2 K_1) + R_{np} \sum_{v=2}^{v_{max}} I_v^2 K_v ; \quad (4)$$

$$Q_{ins} = U^2 2\pi f C t g \delta_1 + \sum_{v=2}^{v_{max}} U_v^2 2\pi f v C t g \delta_v , \quad (5)$$

где  $R_{np}$  – сопротивление проводникового материала, Ом;  $t g \delta_v$  - тангенс угла диэлектрических потерь на частоте гармоники с номером  $v$ ;  $C$  – электрическая емкость образца.

Для определения мощности тепловыделения в изоляционных материалах кабельной линии необходимо знать значения частичных емкостей (рис. 1). Учитывая, что силовой кабель является симметричной системой, численные значения определяются по выражению [7]

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{12} = \tilde{N}_{23} = \tilde{N}_{31}; \\ C_{10} = \tilde{N}_{20} = \tilde{N}_{30}; \\ C_{12} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{r_1 + \Delta_1 + \sqrt{2r_1\Delta_1 + \Delta_1^2}}{r_1 + \Delta_1 - \sqrt{2r_1\Delta_1 - \Delta_1^2}}}; \\ C_{10} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{r_2^2 + r_1^2 - a^2 + \sqrt{(r_2^2 - r_1^2 + a^2) - 4a^2r_2^2}}{r_1r_2}}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $C_{10}$  – частичная емкость между фазным проводником и металлическим экраном;  $C_{12}$  – частичная емкость между фазными проводниками;  $r_1$  – радиус токопроводящей жилы;  $\Delta_1$  – толщина фазной изоляции;  $r_2$  – радиус защитных покровов;  $a$  – расстояние между центрами окружностей и токопроводящей жилой.

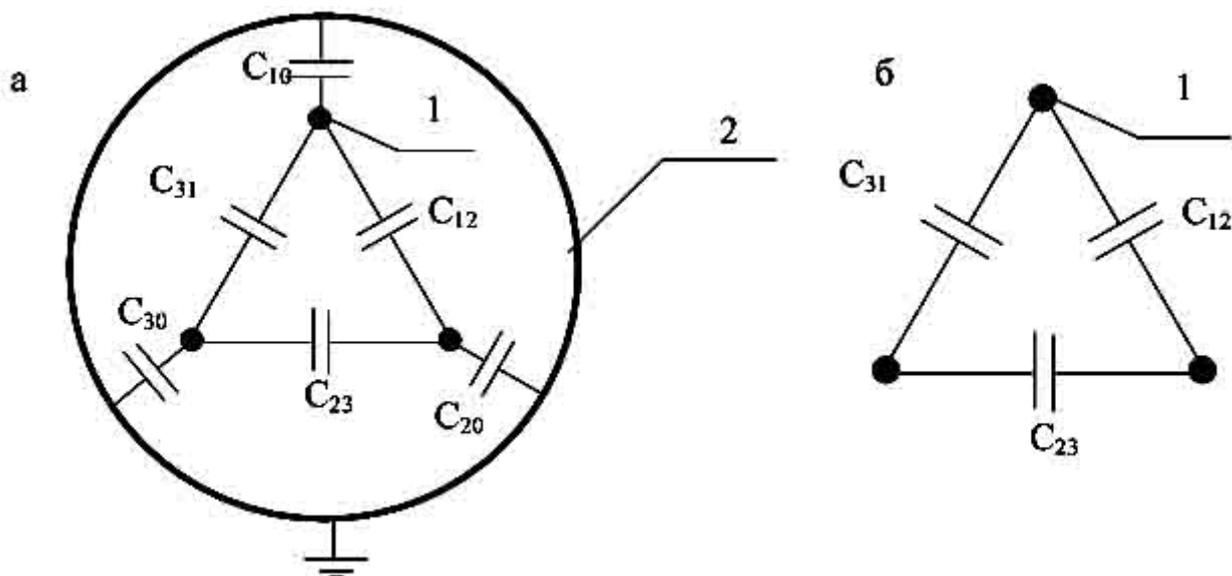


Рис. 1.

Поперечная схема замещения кабельной линии: а – напряжением выше 1 кВ; б – напряжением до 1 кВ. 1 – фаза кабеля; 2 – заземленная металлическая оболочка.

Выделяемая тепловая энергия может быть поглощена окружающим атмосферным воздухом и элементами конструкций. Существует три способа передачи тепловой энергии: излучение, конвекция, теплопроводность.

Для создания расчетной модели предлагается использовать программный комплекс EICut 5.4. Процесс моделирования состоит из трех основных этапов: создание геометрической модели системы, определение путей передачи тепловой энергии, запись коэффициентов теплопередачи. Модель для трехжильного кабеля с поливинилхлоридной изоляцией представлена на рис. 2.

Для определения характеристик теплопередачи предполагается, что отдача тепловой энергии с поверхности фазным проводам происходит путем теплопроводности, а с поверхности внешней оболочки – всеми тремя возможными способами теплопередачи.

На основании изложенного выше, произведен расчет распределения температуры в изоляционной конструкции кабеля АВВГ 3х50, питающего группу частотных преобразователей. Величина тока, протекающего в нормальном режиме работы оборудования, по результатам измерений составляет 224, А.

Исходными данными являются радиусы фазных проводов, геометрические размеры изоляции, коэффициент теплопроводности материалов  $K_{\text{теп}}$ , Вт/(м К), удельная теплоемкость материалов, кДж/

[8]  
(кг К)

Тепловая мощность источника энергии характеризуется объемной плотностью мощности тепловыделения. Ее значение определяется по следующим выражениям:

$$q = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\pi(r_1 \cdot 10^{-3})^2 l}; \tag{7}$$

$$q_{ins} = \frac{Q_{ins}}{V_{ins}} = \frac{Q}{\pi l(((r_1 \cdot 10^{-3}) + \Delta_1)^2 - (r_1 \cdot 10^{-3})^2)}, \tag{8}$$

где  $q$  и  $q_{ins}$  – объемные плотности мощности тепловыделения в фазном проводе и изоляции;  $l$  – длина кабеля.

Подставляя в (7 и (8) установленные числовые значения, получим следующие результаты, которые сведены в табл. 1.

Таблица 1.

Объемные плотности тепловыделения.

Плотность тепловыделения	Значение, Вт/м <sup>3</sup>
Плотность тепловыделения в проводнике: без учета высших гармоник	73609,161
с учетом высших гармоник	91315,149
Плотность тепловыделения в изоляции: без учета высших гармоник	19,649
с учетом высших гармоник	19,844

Диаграмма распределения температур в поперечном сечении кабельной линии представлена на рис. 2

Расчет проводился для контура А-В (рис.2) при температуре окружающей среды 298, К. Максимальная разность температур во внутреннем слое изоляции в случае наличия в сети высших гармоник тока и напряжения достигает 11,4, К. Максимальная величина дополнительного нагрева кабеля составляет 2,7, К. На основании предложенной методики рассчитаны численные значения приращения температуры внутренней изоляции кабелей различного сечения при наличии в сети высших гармоник. Результаты расчетов сведены в табл. 2

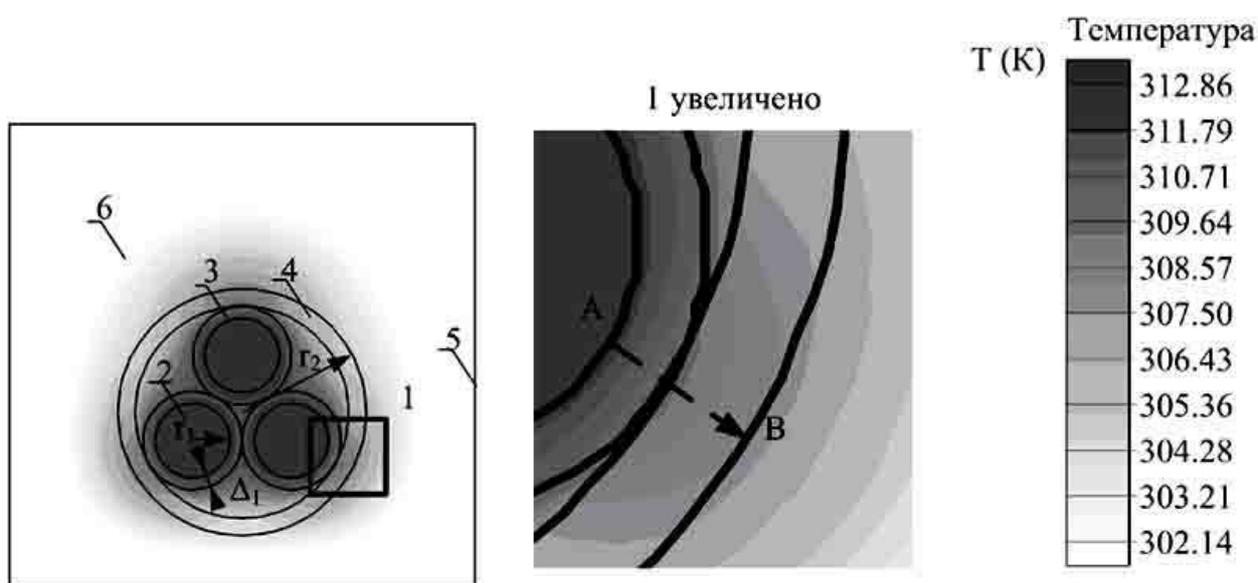


Рис. 2.

Геометрическая модель кабеля АBBV и диаграмма распределения температур: 1 – фрагмент модели; 2 – фазный провод; 3 – внутренняя изоляция; 4 – оболочка; 5 – окружающие кабель объекты; 6 – атмосферный воздух.

Таблица 2.

Значения приращения температуры кабелей.

Марка кабеля	Приращение температуры $\Delta\tau$ , °C
ВВГ 3 x 4	3,2..3,4
ВВГ 3 x 25	3,0.. 3,1
ВВГ 3 x 35	2,9..3,1
<u>[9]</u> ВВГ 4 x 6	2,2..2,3
ВВГ 4 x 50 <sup>9</sup>	1,9... 2,2

[10]

Срок службы определяется уравнением Аррениуса .

$$V_{cr} = V_0 \exp(-W_a / RT); \tag{9}$$

$$\tau_{сл} = K / V_{cr}, \tag{10}$$

где  $V_{cr}$  – скорость протекания химических реакций в диэлектрике;  $\tau_{сл}$  – срок службы изоляции;  $K$  – поправочный коэффициент, зависящий от типа материала диэлектрика;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура изоляции.

Отношение сроков службы изоляции при различных температурах равно<sup>7</sup>

$$\frac{\tau_{сл1}}{\tau_{сл2}} = \exp(-\alpha(T_1 - T_2)) = 2^{-(T_1 - T_2) / \Delta T} \tag{11}$$

где  $\Delta T$  – величина приращения температуры, вызывающей сокращение срока службы изоляции в 2 раза.

Значение этого коэффициента можно приближенно определить по таблице 3 в зависимости от

[11]

класса изоляции

**Таблица 3.**  
**Значение коэффициента  $\Delta T$ .**

Класс изоляции	$\Delta T$ , К
А	8
В	8-10
Н	12

Для сохранения срока службы при наличии высших гармоник в сети необходимо снижение тока в проводнике. Если предположить, что с уменьшением тока частотный спектр остается неизменным, то с учетом (6) получим следующее соотношение токов:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{(K_1)}{(K_1 + \sum_{v=2}^{v_{max}} K_v K_{Av})} \tag{12}$$

Если пренебречь поверхностным эффектом, то (16) примет вид

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{1 + \sum_{v=2}^{v_{max}} K_{Av}} \tag{13}$$

Предложенная методика позволяет определить уровень безотказности электрооборудования в зависимости от характеристик спектра высших гармоник в системе электроснабжения и учитывать

изменение ресурса при проектировании электрических сетей. Возможно проведение оценки ресурса не только кабельных линий электропередачи, но и любого силового электрооборудования, имеющего электроизоляционные элементы. Приведенная модель в значительной степени повышает точность определения надежности изоляционных конструкций.

### Литература.

1. Баскин, Э.М. Оценка остаточного ресурса полиэтиленовых (XLPE) изолирующих кабелей, находящихся в эксплуатации/ Э.М. Баскин// Электротехника. – 2004. – №2. – С.33-35.
2. Гиберт, Д. П. Надежность электрической изоляции/ Д. П. Гиберт – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 61 с.
3. Киреева, Э.А. Справочник электрика/ Э.А. Киреева, Л.В. Гусев, А.Г. Харитон. – М.: Колос, 2008. – 464 с. Кузнецов, Н.Л. Надежность электрических машин/ Н.Л. Кузнецов. – М: Изд-во МЭИ, 2006. – 432 с.
4. Пашков, В.Н. Обеспечение эффективности функционирования систем электроснабжения листопрокатных производств с негативными возмущающими факторами: Дисс. канд. техн. наук, специальность 05.09.03 – Липецк: ЛГТУ, 2004.
5. Середкин, О.А. Обеспечение эффективности функционирования электрических систем листопрокатного производства: Дисс. канд. техн. наук, специальность 05.09.03 – Липецк: ЛГТУ, 1999.
6. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1974. – 944 с.
7. Шпиганович, А.Н. Внутриводское электроснабжение и режимы / А.Н. Шпиганович, К.Д. Захаров. – Липецк: ЛГТУ, 2007. – 742 с.
8. Штиллер, В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика/ В. Штиллер. – М.: Мир, 2000. – 176 с.
9. Электротехнический справочник: Том 1/ под ред. П.Г. Грудинского, М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 880 с.
10. ГОСТ 10518-88. Системы электрической изоляции. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость.

**Поступила в редакцию 21.07.2008 г.**

- 
- [1] Пашков, В.Н. Обеспечение эффективности функционирования систем электроснабжения листопрокатных производств с негативными возмущающими факторами: Дисс. канд. техн. наук, специальность 05.09.03 – Липецк: ЛГТУ, 2004.
- [2] Гиберт, Д. П. Надежность электрической изоляции/ Д. П. Гиберт – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 61 с.
- [3] Баскин, Э.М. Оценка остаточного ресурса полиэтиленовых (XLPE) изолирующих кабелей, находящихся в эксплуатации/ Э.М. Баскин// Электротехника. – 2004. – №2. – С.33-35.
- [4] Кузнецов, Н.Л. Надежность электрических машин/ Н.Л. Кузнецов. – М: Изд-во МЭИ, 2006. – 432 с.
- [5] Шпиганович, А.Н. Внутриводское электроснабжение и режимы / А.Н. Шпиганович, К.Д. Захаров. – Липецк: ЛГТУ, 2007. – 742 с.
- [6] Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов/ Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1974. – 944 с.
- [7] Середкин, О.А. Обеспечение эффективности функционирования электрических систем листопрокатного производства: Дисс. канд. техн. наук, специальность 05.09.03 – Липецк: ЛГТУ, 1999.
- [8] Киреева, Э.А. Справочник электрика/ Э.А. Киреева, Л.В. Гусев, А.Г. Харитон. – М.: Колос, 2008. – 464 с.
- [9] Для четырехжильных кабелей приращение температуры определялось при отсутствии уравнивающих токов в нулевом проводнике.
- [10] Штиллер, В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика/ В. Штиллер. – М.: Мир, 2000. – 176 с.
- [11] ГОСТ 10518-88. Системы электрической изоляции. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость.