**УДК 621.3.018.3**

А.В. ЗАСИМЕНКО, студент гр. ЭПП-52 (ГГТУ)
Научные руководители: Т.В. АЛФЕРОВА, к.т.н., доцент (ГГТУ);
А.Ю. РУДЧЕНКО к.т.н., доцент (ГГТУ)
г. Гомель

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ АВБбШв (4х70) ОТ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

В идеальной электроэнергетической системе энергия должна передаваться при нормальных значениях частоты и напряжения, не изменяющихся во времени. Однако, в реальных энергосистемах эти условия не выполняются.

Присутствующие в кабельных линиях нелинейных электропотребителей высшие гармонические составляющие приводят к негативным, а иногда и к аварийным последствиям: возможному перегреву и разрушению нулевых рабочих проводников кабельных линий вследствие их перегрузки токами третьей гармоники. Гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, создают дополнительные потери в кабельных линиях, что связано с увеличением действующего значения негармонического тока, увеличением активного сопротивления проводника из-за скин-эффекта и увеличением диэлектрических потерь; способствуют ускоренному старению изоляции проводов и кабелей [1].

Для анализа степени влияния нелинейной нагрузки на питающие кабели с целью получения зависимостей сопротивления изоляции кабеля от частоты приложенного напряжения была собрана экспериментальная установка.

При проведении эксперимента генератор выдавал сигналы различной частоты, которые поступали на усилитель мощности и затем подавались на изоляцию кабельной линии 0,4 кВ (АВБбШв (4х70)). Напряжение подавалось между одной из жил кабельной линии и оплеткой, выполненной из металлических лент.

В ходе эксперимента регистрировалось напряжение на входе кабельной линии $U_1$ (между точками А и В), падение напряжения $U_2$ на резисторе $R_ш$=100 Ом (между точками В и С), частота входного сигнала и угол сдвига между напряжениями $U_1$ и $U_2$. Данные снимались с осциллографа в виде осциллограмм, далее оцифровывались и записывались в файл в виде мгновенных значений.

Данные обработки представлялись в виде таблицы, приведенной на рис. 1.

M =

| | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 50 | $1.173 \cdot 10^5$ | 3.875 | 131.134 |
| 1 | 50 | $1.173 \cdot 10^5$ | 3.42 | 106.822 |
| 2 | 51.939 | $1.18 \cdot 10^5$ | 4.275 | 123.681 |
| 3 | 56.98 | $1.194 \cdot 10^5$ | 4.542 | 127.519 |
| 4 | 59.944 | $1.201 \cdot 10^5$ | 4.972 | 129.064 |
| 5 | 62.937 | $1.207 \cdot 10^5$ | 4.647 | 125.161 |
| 6 | 67.024 | $1.215 \cdot 10^5$ | 4.358 | 124.33 |
| 7 | 70.028 | $1.22 \cdot 10^5$ | 4.865 | 120.955 |
| 8 | 72.944 | $1.223 \cdot 10^5$ | 4.814 | 118.726 |
| 9 | 77.078 | $1.228 \cdot 10^5$ | 4.63 | 119.778 |
| 10 | 79.972 | $1.231 \cdot 10^5$ | 4.627 | 119.756 |
| 11 | 83.001 | $1.234 \cdot 10^5$ | 5.049 | 117.141 |
| 12 | 87.015 | $1.239 \cdot 10^5$ | 4.732 | 116.689 |
| 13 | 90 | $1.24 \cdot 10^5$ | 5.554 | 113.06 |
| 14 | 92.975 | $1.243 \cdot 10^5$ | 5.112 | 125.708 |
| 15 | 97.087 | $1.244 \cdot 10^5$ | 5.894 | ... |

Рис. 1. Данные обработки:
0 столбец – частота напряжения, Гц; 1 столбец – напряжение $U_1$, мВ;
2 столбец – напряжение $U_2$, мВ; 3 столбец – угол между
напряжениями $U_1$ и $U_2$

Из-за особенностей схемы установки (ток направлен встречно напряжению), чтобы получить адекватный угол сдвига между током и напряжением от полученного угла необходимо отнять 180 градусов.

По данным таблицы, приведенной на рис. 1, определяется изменение сопротивления изоляции кабельной линии от частоты питающего напряжения (рис. 2):

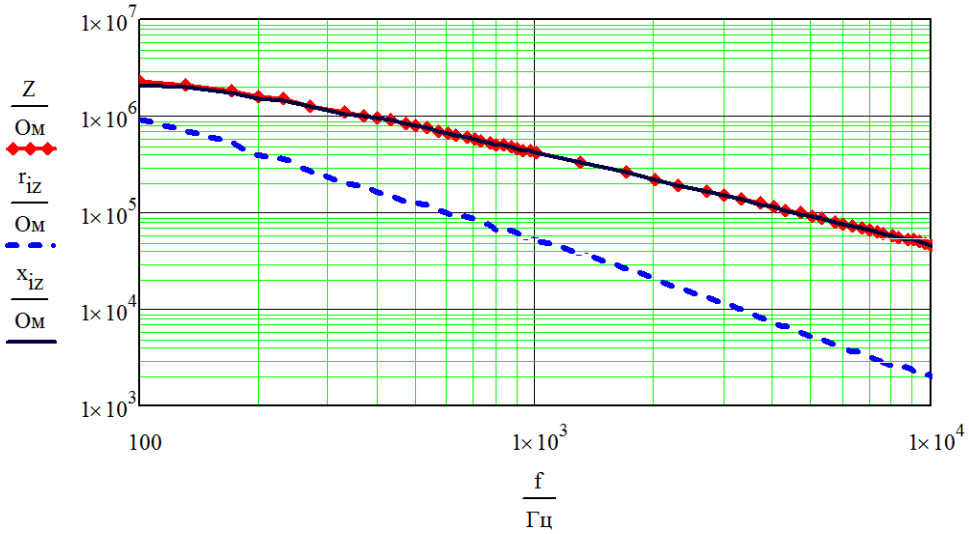


Рис. 2. Зависимости сопротивлений изоляции от частоты
питающего напряжения

На рис. 2 представлены: полное сопротивление изоляции в комплексной экспоненциальной форме $Z$, активное сопротивление изоляции $r_{iz}$, и емкостное сопротивление изоляции $x_{iz}$.

Из анализа рис. 2 следует, что с повышением частоты питающего напряжения сопротивление изоляции кабеля АВБбШв (4х70) уменьшается: так, на частоте 100 Гц активное сопротивление изоляции составляет 92 МОм, а на частоте 470 Гц – 13,2 МОм.

Известно [2], что емкость изоляции зависит от частоты приложенного напряжения. При увеличении частоты емкость уменьшается. Эта зависимость является следствием процессов медленной поляризации, в результате которых происходит накопление зарядов в диэлектрике, что приводит к увеличению его емкости. При переменном напряжении процесс накопления зарядов ограничен длительностью одного полупериода. Чем выше частота, тем в меньшей степени успевают развиваться процессы поляризации и тем меньшей будет емкость.

Частичную емкость изоляции определяем по выражению (1), не учитывающему изменение частоты

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot l}{\ln \frac{R}{r}}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon$ – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции (для ПВХ равна 4,2-4,5); $\varepsilon_o$ – диэлектрическая постоянная $\varepsilon_o = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{Кл^2}{Н \cdot м^2}$; l – длина кабельной линии в км; R – внешний диаметр изоляции; r – внутренний диаметр изоляции.

Чтобы связать данную формулу с частотой, емкость С заменим выражением (2)

$$C = \frac{1}{\omega \cdot x_c}, \qquad (2)$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – угловая частота.

Выразив $x_c$ из формулы (2) и подставив его в формулу (1), получим выражение (3) для расчета емкостного сопротивления изоляции

$$x_C = \frac{\ln \frac{R}{r}}{2^2 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot l \cdot f} \qquad (3)$$

Для кабеля АВБбШв (4х70) отношение $\ln\frac{R}{r}$ принимаем равным 0,00125 [6].

Сравнительная характеристика емкостного сопротивления изоляции: расчетная по выражению (3) и экспериментальная приведены на рис. 3.

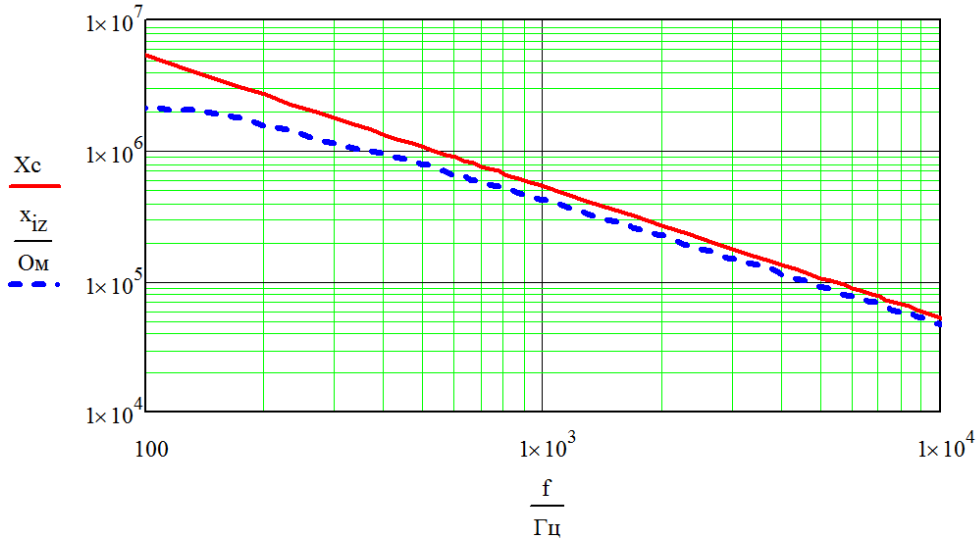


Рис. 3. Сравнительная характеристика расчетного $x_c$ и экспериментального $x_{iz}$ емкостного сопротивления изоляции

Из анализа рис. 3 следует, что емкостное сопротивление, полученное в ходе проведения эксперимента и рассчитанное по формуле (3), начиная с частоты 1кГц имеют минимальное отклонение друг от друга.

Определить активное сопротивление расчетным способом в зависимости от частоты можно выразив его из выражения (4) для определения потерь активной мощности в изоляции

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg\delta\,, \tag{4}$$

заменив $tg\delta = \frac{R}{x}$, после преобразования которого получим выражение (5)

$$R = \frac{P \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}}{U^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C}\,. \tag{5}$$

При этом величина С берется в виде зависимости, полученной экспериментальным путем, чтобы учесть процессы медленной поляризации в диэлектрике при переменной частоте. Потеря мощности принимается постоянной и равной 0,003 Вт [3]; напряжение принимается постоянным и

равным 125В (максимальное значение, выдаваемое экспериментальной установкой). Расчетная и экспериментальная зависимости активного сопротивления от частоты приведены на рис. 4.

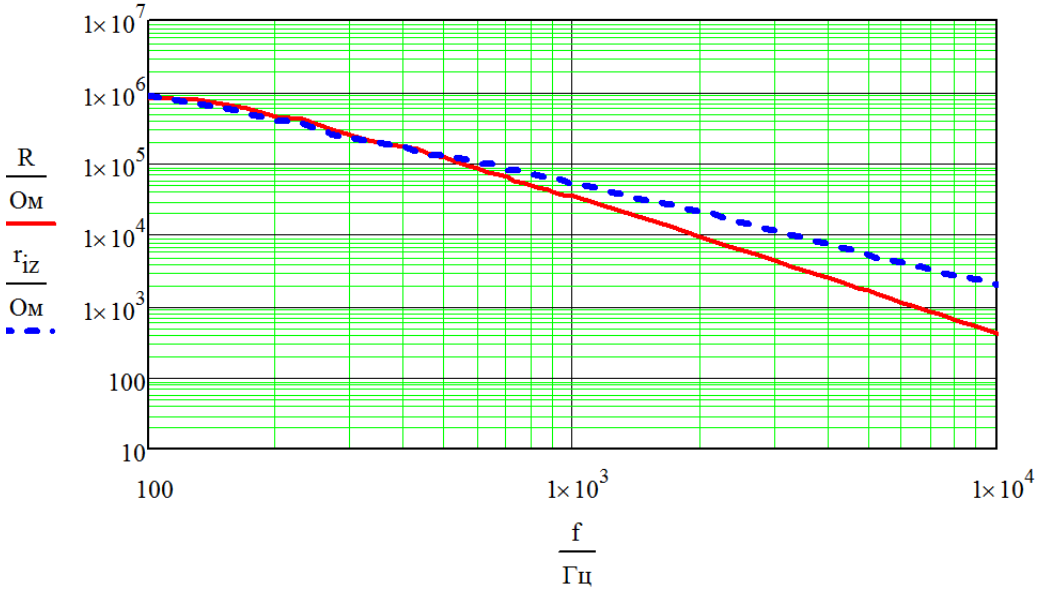


Рис. 4. Зависимость активного сопротивления от частоты

Из анализа рис. 4 следует, что активные сопротивления, полученные экспериментальным и расчетным путем, практически совпадают на частотах до 1кГц, на более высоких частотах расхождение графиков происходит из-за увеличения потерь мощности через диэлектрик с повышением частоты.

Список литературы:

1. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий. – Л.: Энергия, 1977. – 352 с.

2. Основы кабельной техники [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Леонов [и др.]; под ред. И.Б.Пешкова. – М.: Издательский центр «ACADEMIA», 2006. – 432 с.

3. Макаров, Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4-35кВ и 110-1150 кВ. Т. 3 / под. ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова – М.: Папирус ПРО, 2004.