

*А. А. Берко, И. А. Берко*

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ),  
г. Владикавказ [bia-1995@mail.ru](mailto:bia-1995@mail.ru)

## РАСЧЕТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК С УЧЕТОМ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

*В работе рассматривается методика использования активных сопротивлений в расчетах высших гармоник в электрических сетях.*

*Ключевые слова: активные сопротивления; высшие гармоники; электрические сети; амплитудно-частотные характеристики; резонансная частота.*

*A. A. Berko, I. A. Berko*

North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological  
University), Vladikavkaz

## CALCULATION OF HIGHER HARMONICS TAKING INTO ACCOUNT OF ACTIVE RESISTANCES IN ELECTRIC

*The paper discusses the method of using active resistance in the calculations of higher harmonics in electrical networks.*

*Keywords: active resistance, higher harmonics, electrical networks, amplitude-frequency characteristics, resonant frequency.*

Расчет высших гармоник в электрических сетях является одним из наиболее важных и в то же время сложных вопросов проблемы качества электроэнергии. Точный расчет и анализ режима электрической сети невозможен без учета активных сопротивлений.

Однако корректный учет активных сопротивлений (амплитудно-частотных характеристик) элементов электрической сети – весьма сложная задача. В расчетах активными сопротивлениями обычно

пренебрегают и учитывают только реактивные. В этом случае согласно теореме Фостера для чисто реактивных цепей имеет место чередование нулей и полюсов частотных характеристик входных и взаимных сопротивлений [1]. Если в обычных режимах пренебрежение активными сопротивлениями не вносит заметной погрешности, то в случае резонанса токов или напряжений активное сопротивление существенно влияет на оценку частотной характеристики. Но даже при не очень сложной структуре электрической сети расчет частотной характеристики с учетом активных сопротивлений затруднителен, что обусловлено необходимостью проведения его в комплексных числах.

В связи с этим возникает потребность в разработке достаточно простой методики оценки активного сопротивления электрической сети. Для решения поставленной задачи использованы расчеты амплитудно-частотных характеристик активных и реактивных сопротивлений для электрических цепей различной сложности и конфигурации. На рис. 1 приведен характерный участок амплитудно-частотной характеристики активного и реактивного сопротивлений вблизи резонанса токов и напряжений.

Как видно из рисунка, для нерезонансных режимов, а также в случае резонанса напряжений входное активное сопротивление электрической сети практически неизменно. Его можно с достаточной для практических расчетов точностью определить путем схемы замещения, составленной только из активных сопротивлений. В случае резонанса токов активное сопротивление существенно возрастает и становится определяющим при нахождении полного сопротивления. Оценим значение активного сопротивления при резонансе токов.

Эквивалентная схема электрической сети при параллельном резонансе имеет вид, показанный на рис. 2. Полное сопротивление этой цепи на частоте  $\omega$  [2] определяется по формуле

$$Z = \frac{(r_{\Sigma} + j\omega L) \left(-\frac{j}{\omega C}\right)}{r_{\Sigma} + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}, \quad (1)$$

где  $r_{\Sigma}$  – суммарное активное сопротивление контура.

Резонансная частота рассматриваемой цепи

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r_{\Sigma}^2}{L^2}} \approx \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad (2)$$

так как  $r_{\Sigma} \ll \omega_0 L$ .

С учетом этого

$$z = \frac{L}{Cr_{\Sigma}} - j \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{X_C^2}{r_{\Sigma}} - jX_C, \quad (3)$$

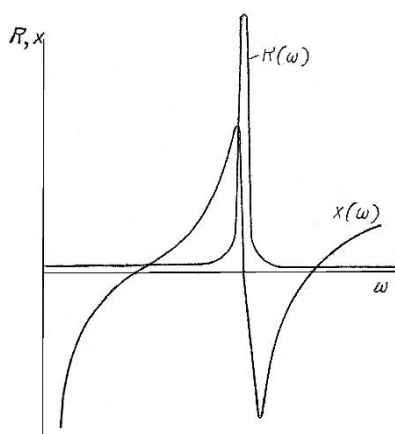


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика входного сопротивления сети

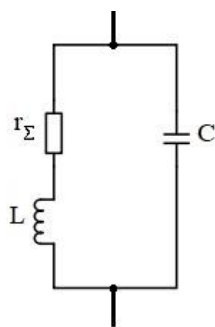


Рис. 2. Схема замещения сети при параллельном резонансе

где  $X_c$  – емкостное сопротивление контура на частоте параллельного резонанса.

Таким образом, активное сопротивление при резонансе токов определяется по выражению

$$R = X_C^2 / r_{\Sigma} \quad (4)$$

Необходимо отметить, что это выражение можно использовать для гармоник, частоты которых отличаются от резонансной не более чем на  $\pm 5\%$ . При этом погрешность определения эквивалентного активного сопротивления составляет 10–15%. Данный метод может быть применим для электрических сетей 6–10 кВ, отличающихся высокой добротностью.

Важным в рассматриваемом вопросе является метод определения активных сопротивлений различных элементов на частотах гармоник. Существующие методы определения активных сопротивлений дают противоречивые результаты и, на наш взгляд, окончательный вывод о применимости того или иного подхода можно сделать лишь после тщательных экспериментальных исследований [3, 4].

#### Список использованных источников

1. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях: учебник / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. М. : Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
2. Основы теории цепей : учебник / В. А. Ляшев, Н. И. Мережин, В. П. Попов. 7-е изд. М. : Изд-во Юрайт, 2015. 696 с.
3. Берко А. А., Берко И. А. Эффективность применения статических регулируемых источников реактивной мощности в условиях роста тарифов на электроэнергию // Научно-техническая конференция обучающихся и молодых ученых СКГМИ (ГТУ) «НТК-2017» : сборник докладов по итогам научно-исследовательских работ. Владикавказ : Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 2017. С. 80–83.
4. Гаврина О. А., Босиков И. И., Берко И. А. Разработка методов по улучшению использования электрооборудования природно-промышленной системы горно-перерабатывающего комплекса // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 2 (82). С. 12–19.