

**А.В. Остапчук**

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

## **ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ АВАРИЙНЫХ ТОКОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ КАРЬЕРОВ**

**Введение.** В распределительных сетях величина тока однофазного замыкания на землю определяется уровнем емкостной, активной и высших гармонических (ВГ) составляющих [1]. Величину емкостной и активной составляющей можно измерить и определить известными методами [2]. Значение составляющей ВГ, величина переменная, зависящая от различных факторов.

**Анализ последних достижений.** Номинальная мощность трансформаторов, установленных в какой либо системе, обычно в несколько раз превышает номинальную мощность генераторов. Поскольку намагничивающий ток трансформаторов имеет несинусоидальную форму, они могут рассматриваться как источники высших гармоник. По этим причинам явления, связанные с высшими гармониками, могут быть приписаны главным образом нелинейным характеристикам намагничивания трансформаторов. Из всего спектра ВГ должны приниматься во внимание обычно две или три, при чем их порядок и амплитуда часто меняется с изменением условий работы и конфигурации сети. Уже при среднем насыщении стали, трансформаторы вызывают своим искаженным намагничивающим током пятые и седьмые высшие гармоники со значительными амплитудами и направляют их в сеть, где каждая из них образует полную трехфазную систему [3].

**Формулирование целей и постановка задачи.** При рассмотрении данных процессов ранее, мало внимания уделялось вопросу стекания в землю высокочастотного тока и влияния величины переходного сопротивления на его значение. Не анализировалось формирование собственной частоты высокочастотных колебаний при возникновении перемежающейся дуги. Цель данной статьи – расчет собственной частоты колебательного контура для наиболее типичных параметров карьерных сетей и оценка влияния переходного сопротивления на величину высших гармоник в токе замыкания на землю.

**Изложение основного материала** Емкость системы и индуктивность рассеяния трансформатора определяют резонансную частоту  $\omega_f$ , поэтому рассмотрим резонансный контур, под действием одной из гармоник, постоянно действующей в сети. Отсюда вытекает, что вынужденные колебания будут усиливаться, если их частота окажется близкой к собственной частоте контура (точное совпадение частот необязательно). Очевидно также, что с изменением конфигурации сети будут меняться собственная частота и амплитуда вынужденных колебаний [4]. Мощность и продолжительность колебаний зависят от индуктивности, емкости и сопротивления цепи эквивалентного контура, в котором создаются колебания. Подача напряжения на заземленную сеть сопровождается

возникновением в переходном режиме высокочастотных колебаний тока. Частота колебаний тока зависит от индуктивности колебательного контура, и его емкости. Рассчитаем собственную резонансную частоту  $\omega_f$  колебательного контура, образованного при аварийном режиме. На рис. 1 показаны пути тока высокочастотных колебаний при замыкании фазы на землю в распределительной сети.

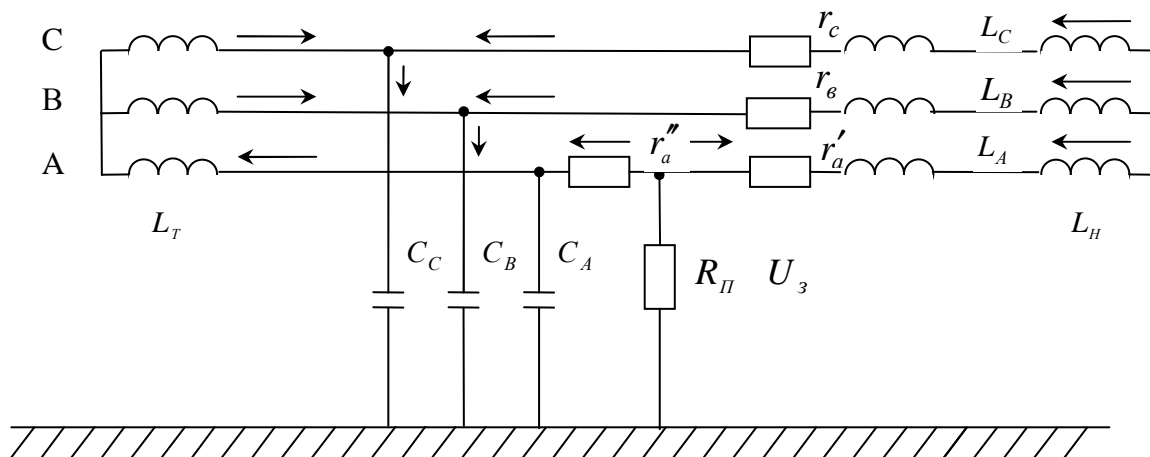


Рис. 1. Схема цепи высокочастотного тока при однофазном замыкании в сети:  $C_C = C_B = C_A$  – емкостное сопротивление изоляции фазы;  $R_{II}$  – переходное сопротивление в точке замыкания;  $L_A, L_B, L_C$  – индуктивные сопротивления фаз;  $L_H$  – приведенная индуктивность фазы нагрузки;  $r_A, r_B, r_C$  – активные сопротивления фаз фидера;  $U_3$  – напряжение на заземлителе;

Выполним приведение данной схемы относительно поврежденной фазы (рис. 2), где с некоторым приближением индуктивности фаз трансформатора подстанции и нагрузки включаются параллельно.

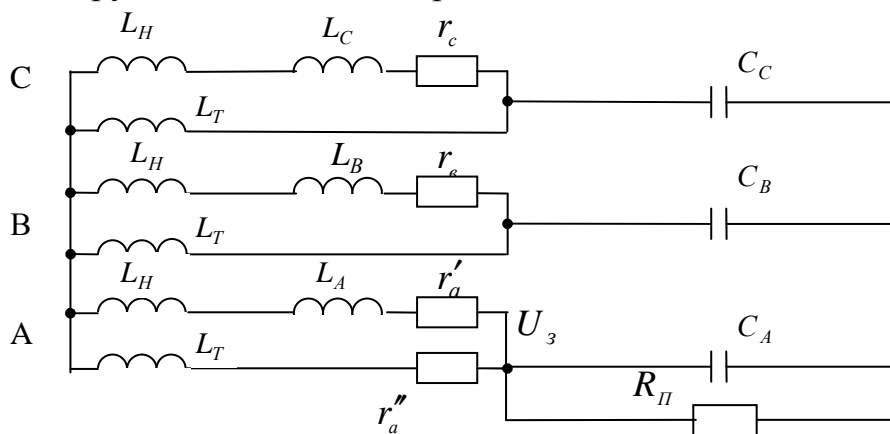


Рис. 2. Преобразованная схема замещения

В приведенной схеме замещения  $L_T$  – индуктивность источника питания, т.е. трансформатора, обычно это ТМН–2500/35 и ТМН–4000/35 и  $L_H$  – индуктивность трансформатора нагрузки, наиболее часто применяемые трансформаторы на нагрузке мощностью 100 и 250 кВА. Индуктивное сопротивление ко-

лебательного контура определится в основном индуктивностью обмоток трансформаторов, что является характерной особенностью для сетей данного класса. Индуктивное сопротивление трансформатора по [5] для обмотки 10 кВ:

$$x_{mp} = \frac{10u_k U_H^2}{S_H} = \frac{10 \cdot 6,5 \cdot 10^2}{2500} = 2,6 \text{ Ом} \quad (1)$$

где  $u_k$  – напряжение короткого замыкания;  $U_H$  – номинальное напряжение;  $S_H$  – номинальная мощность трансформатора (для ТМН–2500/35/10  $u_k=6,5\%$ ;  $U_H=35\text{кВ}$ ;  $S_H=2500$  кВА).

Индуктивное сопротивление трансформатора нагрузки (для ТМ–250/10  $u_k=4,5\%$ ;  $U_H=10\text{кВ}$ ;  $S_H=250$  кВА):

$$x_{mpn} = \frac{10 \cdot 4,5 \cdot 10^2}{250} = 18 \text{ Ом.} \quad (2)$$

Из полученных значений следует, что индуктивное сопротивление нагрузки в 10 раз больше сопротивления источника энергии – трансформатора подстанции, поэтому, пренебрегая некоторыми параметрами можно составить упрощенную эквивалентную схему и ее расчетную модель, рассматриваемые линии также имеют небольшую протяженность (1-2 км), что позволяет пренебречь индуктивностью фаз (рис. 3).

Расчетная модель этой схемы для однофазного замыкания на землю примет вид (рис. 4).

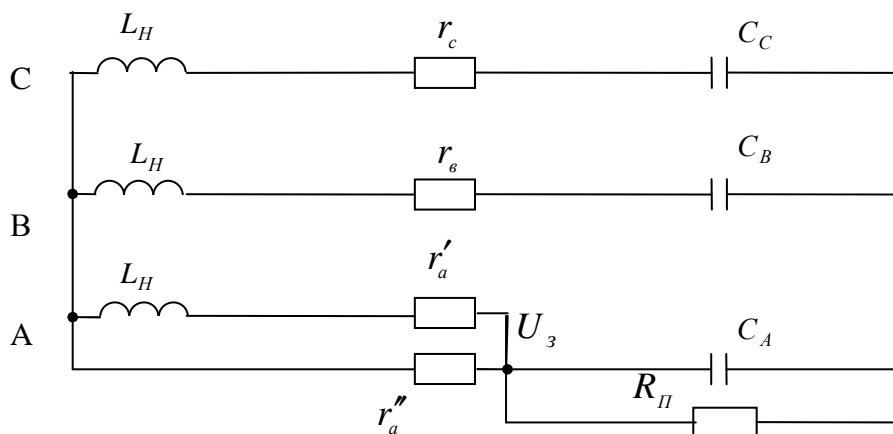


Рис.3. Эквивалентная схема при однофазном замыкании на землю

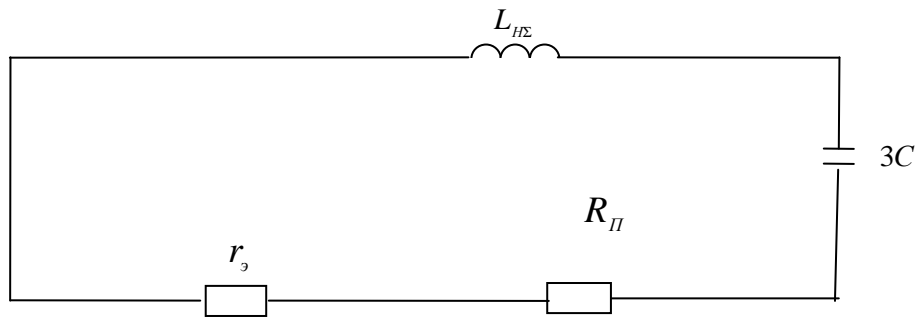


Рис.4. Расчетная модель схемы замещения при однофазном замыкании на землю

Индуктивность обмоток трансформатора равна [6]:

$$L_{H\Sigma} = \frac{x_{mpH}}{\omega} = \frac{18}{314} = 0,057 \quad (4)$$

где  $x_{mp}$  – индуктивное сопротивление трансформатора;  $\omega$  – угловая частота  $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}$ .

После выполненных расчетов можно определить собственную частоту колебательного контура:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{H\Sigma} \cdot 3 \cdot C}} = \frac{1}{6,28\sqrt{0,057 \cdot 3 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6}}} \approx 250 \text{ Гц} \quad (5)$$

Это означает, что если при данных параметрах сети в нормальном режиме силовым трансформатором генерируется 5-я гармоника, то ее значение наложится на собственную частоту свободных колебаний и напряжение 5-й гармоники значительно возрастет в аварийном режиме.

Металлическое замыкание при эксплуатации сетей возникает крайне редко, то есть постоянно присутствует определенное значение переходного сопротивления  $R_{II}$ . Оценим величину тока однофазного замыкания на землю, учитывая величину наиболее доминирующей ВГ и задавшись рядом переходных сопротивлений.

Величина тока 5 – й гармоники, присутствующая в токе замыкания, может быть вычислена по формуле:

$$I_{v5} = \frac{I_c U_{\phi v5v}}{U_{\phi v1} \sqrt{\left(\frac{R_v}{X_c}\right)^2 + 1}} \quad (5)$$

где  $U_{\phi v5}$  – величина 5 - й гармоники напряжения;  $U_{\phi v1}$  – величина основной гармоники напряжения;  $I_c$  – составляющая рабочей частоты собственного ем-

костного тока линии при отсутствии на ней повреждения (в этом выражении  $X_c = \frac{1}{3C\omega}$ );  $R$  – активное сопротивление контура ( $R = R_n + r_s$ );  $\nu$  – порядок гармоники,  $\nu = 5$ .

Зададимся значением собственного емкостного тока линии  $I_c = 20$  А. Так как диапазон изменения величины емкостного тока для данных сетей, то рассмотрим значение тока ( $I_c = 20$  А, емкость сети  $C_{max} = 2,5 \cdot 10^{-6}$  Ф).

Значения переходного сопротивления  $R_n = 1, 10; 100; 1000; 10000$  Ом; уровень гармоники относительно основной  $\frac{U_{\phi\nu 5}}{U_{\phi\nu 1}} = 0,03$ . Зависимость тока 5 – й

гармоники от переходного сопротивления изображена на рис 5, кривые 2 и 3 показывают зависимость тока высокой частоты от различных значений емкости.

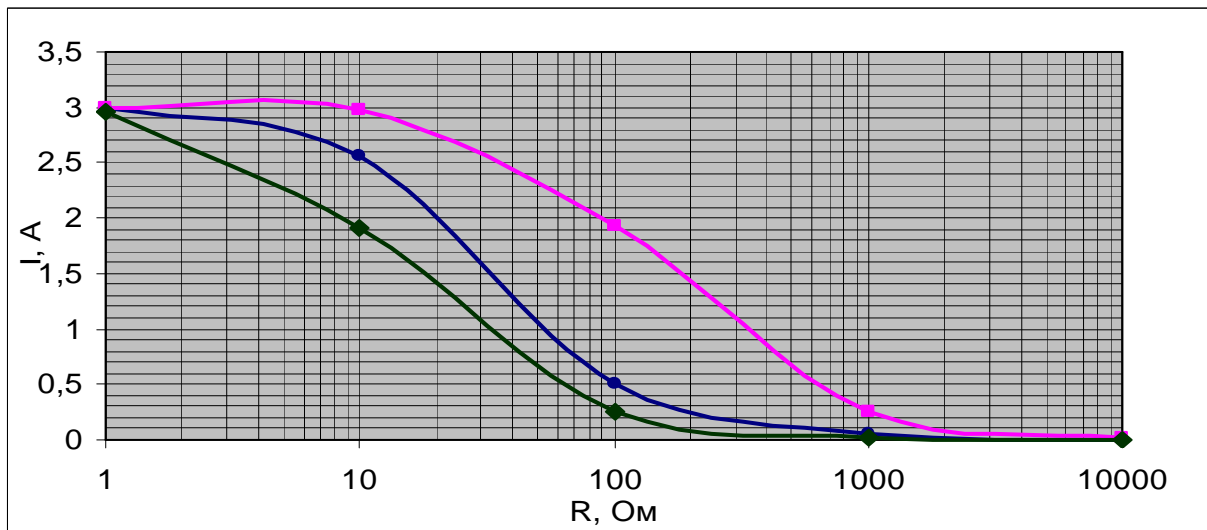


Рис. 5 Зависимость  $I_{\nu 5} = f(R_n)$  при различных емкостях присоединения (1 – 0,5 мкФ; 2 – 2,5 мкФ; 3 – 5 мкФ)

**Заключение.** Расчеты, выполненные в данной работе, позволили установить собственную частоту колебательного контура в реальных распределительных сетях карьеров. Также исследован уровень наиболее значимо представленной 5-той гармоники в зависимости от значения переходного сопротивления при однофазном замыкании на землю. По полученным зависимостям можно установить, что при небольшом значении емкости и малом переходном сопротивлении до 10 Ом, значение тока уменьшается плавно. При больших величинах  $R_{II}$  около 1000 Ом – ток не превышает 0,1 А.

#### Список литературы

1. Вайнштейн В.Л. Исследование высших гармоник тока замыкания одной фазы на землю.// Промышленная энергетика, – 1986, №1 – С. 39-40.
2. Грибиненко В.И. Разработка блока сопряжения и внешних коммутаций для системы непрерывного контроля и защиты от утечек распределительных сетей горных предприятий на-

- пряжением выше 1000 В. // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. сб. – 1999, № 63 – С. 15-18.
3. Либкинд М.С. Высшие гармоники, генерируемые трансформаторами. М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 101 с.
  4. Вильгельм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. – М.– Л.: ГЭИ, 1959.
  5. Справочник по проектированию электроснабжения /Под ред. В.И. Круповича – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980 – 456 с.
  6. Отчет о НИР “Разработка защитных мер безопасности при ведении работ в сетях 6-10 кВ с учетом емкостных токов утечки” Винница. 1982 – 93 с.