

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА  
И НАПЯЖЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
НАПЯЖЕНИЯ ПРИ СИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Н. В. ЛИСЕЦКИЙ, В. К. СКРИПКО, А. Н. БУРНАШЕВ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

Значительное упрощение схем релейной защиты может быть достигнуто путем преобразования трехфазной системы токов или напряжений в однофазную систему напряжений. В [1] рассматривается возможность применения для этой цели утроителя частоты системы Спинелли. Устройства, предназначенные для преобразования трехфазной системы напряжений в однофазную, названы нами ферромагнитными преобразователями напряжения (ФПН).

Первичные обмотки ФПН соединены в звезду и питаются от измерительных трансформаторов напряжения (рис. 1). В нормальном режиме работы, при трехфазных коротких замыканиях и качаниях линейные напряжения образуют симметричную трехфазную систему.

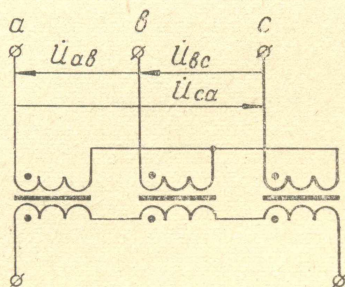


Рис. 1

Аналитическое определение гармоник тока и напряжения ФПН в режиме х. х. производим комплексным методом [2] при следующих допущениях:

1. Потерями на гистерезис и вихревые токи пренебрегаем.
2. Перемагничивание сердечника происходит не по петле гистерезиса, а по основной кривой индукции, полученной баллистическим методом.

Основную кривую индукции аппроксимируем тригонометрическим полиномом [3]:

$$B = \sum_{n=1}^n \theta_{2n-1} \sin(2n-1) \frac{H}{H_0}, \quad (1)$$

где

$H_0$  — значение напряженности поля, соответствующее одному радиану, при этом  $H$  может меняться от  $-\frac{\pi H_0}{2}$  до  $+\frac{\pi H_0}{2}$ ,

$n$  — индекс разложения основной кривой индукции в ряд Фурье.

Коэффициенты  $b_{2n-1}$  определяются методом тригонометрической интерполяции [4].

Ввиду отсутствия нулевого провода гармоники токов, кратные трем, в первичной цепи протекать не будут. По этой причине токи в ней приближенно можно считать синусоидальными. Поэтому достаточно учитывать в аппроксимирующем выражении (1) лишь первую гармонику напряженности. За счет принятой идеализации расчет в целом намного упрощается. Тогда уравнение (1) запишется:

$$B = \sum_{n=1}^n b_{2n-1} \sin \frac{(2n-1)H_{m1} \sin \omega t}{H_0}. \quad (2)$$

Комплексным коэффициентом связи между величинами  $B$  и  $H$  в комплексном исчислении является комплексная магнитная проницаемость  $\nu$ -того порядка  $\bar{\mu}_\nu = \frac{K_\nu(B)}{K_\nu(H)}$ .

В [5] получено выражение для комплексной магнитной проницаемости

$$\bar{\mu}_\nu = \frac{2}{H_\nu} \sum_{n=1}^n b_{2n-1} \cdot J_\nu \frac{(2n-1)H_{m1}}{H_0}, \quad (3)$$

где

$J_\nu \frac{(2n-1)H_{m1}}{H_0}$  — бesselева функция первого рода  $\nu$ -того порядка от действительного аргумента.

Применяя второй закон Кирхгофа и закон полного тока для схемы Спинелли, составляем комплексные уравнения преобразователя в режиме х. х.:

$$\begin{cases} Z_{\nu I}(\dot{I}_{m\nu a} - \dot{I}_{m\nu b}) + j\nu\omega W_I S(\bar{\mu}_{\nu a}\dot{H}_{m\nu a} - \bar{\mu}_{\nu b}\dot{H}_{m\nu b}) = \dot{U}_{m\nu ab}, \\ \dot{I}_{m\nu a} W_I = \dot{H}_{m\nu a} l, \quad \dot{I}_{m\nu b} W_I = \dot{H}_{m\nu b} l, \\ \dot{I}_{m\nu b} = a_\nu^2 \dot{I}_{m\nu a}, \quad \dot{H}_{m\nu b} = a_\nu^2 \dot{H}_{m\nu a}, \end{cases} \quad (4)$$

где

$\dot{I}_{m\nu a}$  — комплексная амплитуда  $\nu$ -той гармоники тока в первичной обмотке фазы «а»,

$\dot{H}_{m\nu a}$  — комплексная амплитуда  $\nu$ -той гармоники напряженности в сердечнике фазы «а»,

$W_I$  — число витков первичной обмотки одного трансформатора,

$Z_{\nu I}$  — комплексное сопротивление  $\nu$ -того порядка первичной обмотки одной фазы, в которое входят активная составляющая и сопротивление рассеяния,

$S$  — активная площадь сечения сердечника.

$l$  — средняя длина магнитной силовой линии в сердечнике,

$a_\nu = e^{j\frac{2\pi\nu}{3}}$  — фазовый оператор поворота для  $\nu$ -той гармоники.

С использованием фазового оператора можно записать

$$(1 - a_v^2) \left( Z_{\nu I} \frac{l}{W_I} + i\nu\omega W_I S_{\mu\nu}^- \right) \dot{H}_{m\nu a} = \dot{U}_{m\nu a}, \quad (5)$$

где

$\bar{\mu}_\nu = \bar{\mu}_{\nu a} = \bar{\mu}_{\nu b} = \bar{\mu}_{\nu c}$  — в силу симметрии цепи.

Полагая в (5)  $\nu=1$ , получим:

$$\dot{H}_{m1a} = H_{m1a} e^{j\alpha} = \frac{\dot{U}_{m1a} \cdot e^{-j \frac{\pi}{6}}}{\sqrt{3} \left( \frac{l Z_{1I}}{W_I} + j \frac{2\omega W_I}{H_{m1a}} S \sum_{n=1}^n \theta_{2n-1} \cdot J_{\frac{(2n-1)H_{m1a}}{H_0}} \right)} \quad (6)$$

Это уравнение решается методом итераций.

Действующее значение тока в первичной цепи преобразователя определяется на основании закона полного тока

$$\dot{I}_{1a} = \frac{l \dot{H}_{m1a}}{\sqrt{2} W_I} \quad (7)$$

Комплексная амплитуда  $\nu$ -той гармоники напряжения на выходе ФПН в режиме х. х. будет равна:

$$\dot{U}_{m\nu II} = j\nu\omega W_{II} \dot{S} (B_{m\nu a} + B_{m\nu b} + B_{m\nu c}). \quad (8)$$

Или с учетом фазового оператора можно записать:

$$\dot{U}_{m\nu II} = j\nu\omega W_{II} \dot{S} B_{m\nu a} (1 + a_\nu^2 + a_\nu). \quad (9)$$

Аналогично комплексному коэффициенту связи (3) можно записать комплексное изображение амплитуды для  $\nu$ -той гармоники индукции [5]

$$\dot{B}_{m\nu a} = 2e^{j\nu\alpha} \sum_{n=1}^n \theta_{2n-1} \cdot J_\nu \frac{(2n-1)H_{m1a}}{H_0}. \quad (10)$$

А так как

$$P_\nu = \frac{1}{3} (1 + a_\nu + a_\nu^2) = \begin{cases} 0, & \text{если } \nu \neq 3p \\ 1, & \text{если } \nu = 3p \end{cases} \quad (p - \text{целое число}),$$

то на выходе преобразователя будут присутствовать лишь гармоники, кратные трем.

Итак, действующее значение напряжения третьей гармоники на выходе ФПН будет равно

$$\dot{U}_{3II} = j \frac{18}{\sqrt{2}} \omega W_{II} S e^{j3\alpha} \sum_{n=1}^n \theta_{2n-1} \cdot J_3 \frac{(2n-1)H_{m1a}}{H_0}. \quad (11)$$

Экспериментальное определение гармонического состава тока и напряжения ФПН производилось при помощи электродинамического ваттметра типа Д568 (рис. 2, а и 2, б). Напряжение промышленной частоты подводилось к преобразователю через трехфазный автотрансформатор.

При измерении гармоник тока токовая обмотка ваттметра была включена последовательно с обмоткой одной из фаз преобразователя. Параллельная обмотка ваттметра питалась от генератора звуковой частоты (З.Г.), напряжение на выходе которого контролировалось вольтметром  $V_2$ . При плавном изменении частоты в параллельной обмотке ваттметра максимальное отклонение его подвижной системы соответствовало отсутствию сдвига фаз между током и напряжением одной ча-

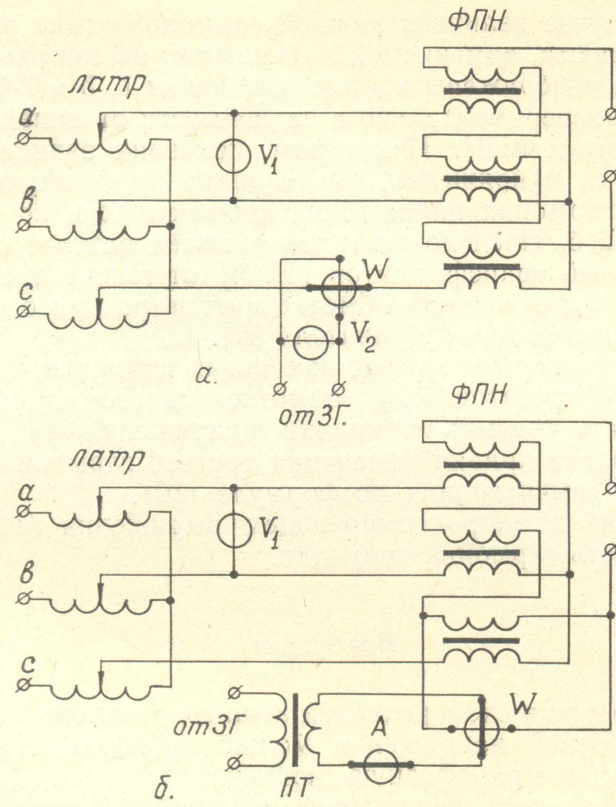


Рис. 2.

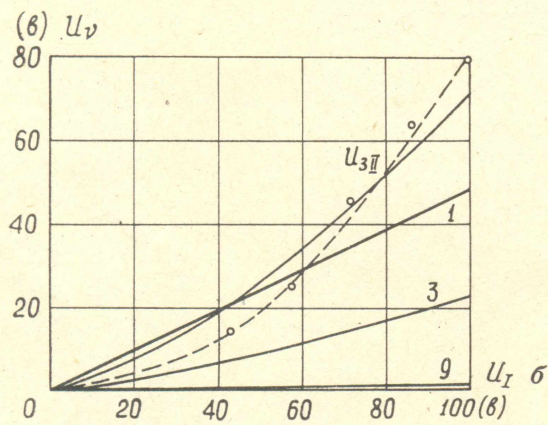
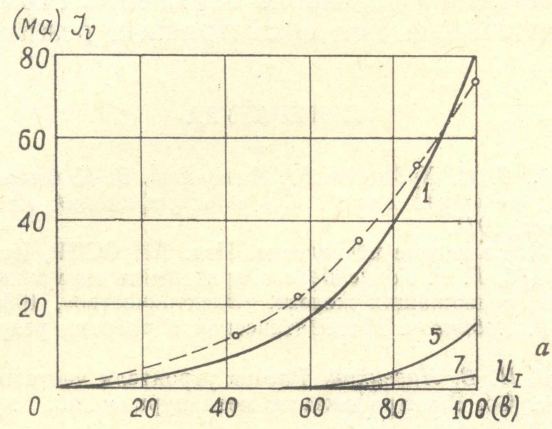


Рис. 3.

стоты. В этом случае величина каждой гармоники тока равна частному от деления мощности, замеряемой ваттметром, на напряжение.

На рис. 3, а изображены кривые изменения 1, 5 и 7-й гармоник тока, полученные экспериментально в зависимости от линейного напряжения, приложенного к ФПН. Пунктиром показана зависимость первой гармоники тока от напряжения, вычисленная по формуле (7).

Измерение гармоник напряжения производилось по схеме, изображенной на рис. 2, б. Последовательная обмотка ваттметра питалась через промежуточный трансформатор (П.Т.) от генератора звуковой частоты (З.Г.). К параллельной обмотке ваттметра присоединялась одна из вторичных обмоток преобразователя [6].

На рис. 3, б построены кривые изменения напряжений гармоник (до 9-й включительно) на вторичной обмотке одного трансформатора, а также зависимость третьей гармоники напряжения на выходе ФПН. Пунктиром показана кривая изменения третьей гармоники напряжения на выходе ФПН, вычисленная по формуле (10).

При расчетах в аппроксимирующем выражении (1) учитывались лишь первые шесть гармоник индукции.

### Выводы

1. Для упрощения схем релейной защиты с помощью ферромагнитных преобразователей напряжения можно преобразовать трехфазную систему напряжений в однофазную систему.

2. Методика расчета, изложенная в настоящей статье, позволяет с достаточной для практики точностью определять гармоники тока и напряжения преобразователя при симметричных режимах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Лисецкий, В. И. Худугуев, Ю. А. Кулага, В. К. Скрипко, А. Н. Бурнашев. Односистемные схемы релейных защит. Сб. Электрификация металлургических предприятий Сибири, Томск, 1971.
2. Г. Е. Пухов. Комплексное исчисление. Изд. АН СССР, Киев, 1961.
3. Л. С. Гольдфарб, Г. Р. Герценберг. Определение гармоник тока и напряжения в электрических цепях, содержащих железо. «Электричество», 1939, I.
4. Э. Уиттекер, Г. Робинсон. Математическая обработка результатов наблюдений. ОНТИ, 1935.
5. В. К. Скрипко, Н. В. Лисецкий. Расчет утроителя частоты системы Спинелли комплексным методом. Сб. Электрификация металлургических предприятий Сибири, Томск, 1971.
6. Н. В. Лисецкий, В. И. Худугуев, Ю. А. Кулага. Определение гармонического состава функционального преобразователя тока. Труды восточно-сибирского технологического института, вып. III, т. 4, 1968.