

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРМОНИК ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ФЕРРОМАГНИТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕТОДОМ ТОЧЕК

А. Н. БУРНАШЕВ, Н. В. ЛИСЕЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций  
и электрических систем и сетей)

В [4, 5] предложены методы аналитического определения гармонического состава выходного напряжения ферромагнитного преобразователя тока (ФПТ). Для осуществления некоторых типов релейных защит (направленных, дистанционных и др.), кроме указанных преобразователей, необходимы также ферромагнитные преобразователи напряжения (ФПН). В качестве ФПН применяются утроители частоты с трехфазным входом и однофазным выходом (схема Спинелли), использующие явление насыщения стали сердечников и свойства многофазных систем [3] (рис. 1).

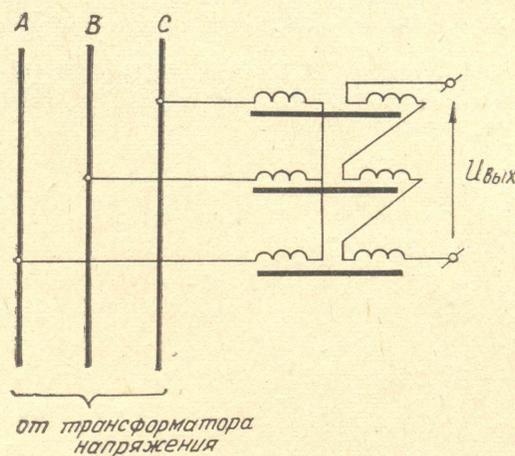


Рис. 1. Схема ферромагнитного преобразователя напряжения

Условия работы ФПН и ФПТ существенно различны. У ФПТ первичные токи синусоидальны. ФПН работает в условиях, когда несинусоидальны и токи, и напряжения. В случае, когда к первичным обмоткам ФПН подведена симметричная система напряжений (нормальный режим или трехфазное короткое замыкание), в выходном напряжении содержатся лишь гармоники, кратные трем [1, 7]. Таким образом, при питании симметричной системой напряжений ФПН работает как утроитель частоты.

При несимметричных повреждениях в защищаемой сети треугольник линейных напряжений искажается, поэтому сердечники трансформаторов ФПН насыщаются неодинаково, и в кривой напряжения на выходе появляются, кроме третьих, также и другие нечетные гармоники (1, 5, 7 и т. д.).

Приближенный метод определения третьей гармоники выходного напряжения, описанный в [1], пригоден лишь для симметричного режима и, кроме того, дает большую погрешность, особенно при изменении питающего напряжения в широких пределах.

Для гармонического анализа выходных величин ферромагнитных преобразователей напряжения, используемых для осуществления односистемных релейных защит, необходим более универсальный метод, одинаково пригодный и для симметричных, и для любых несимметричных режимов, а также для случаев, когда несинусоидальны и токи, и напряжения. В таких случаях наиболее эффективны методы, позволяющие определять мгновенные значения искомых величин (токов или напряжений). Зная мгновенные значения искомой несинусоидальной величины внутри периода ее изменения, легко вычислить приближенные значения амплитуд учитываемых гармоник, а также их начальные фазы.

Приближенный метод определения мгновенных значений несинусоидальной величины в нелинейных цепях был впервые предложен профессором В. Ю. Ломоносовым [6]. В [2] метод получил свое дальнейшее развитие применительно к расчету цепей с выпрямителями и получил название метода точечных преобразований (метод точек).

Кратко сущность метода можно изложить следующим образом: при помощи так называемого прямого точечного преобразования записывают точечное изображение исходного нелинейного дифференциального уравнения (или системы таких уравнений). В результате такого преобразования мы получаем матричное алгебраическое уравнение относительно искомой величины. Решая это уравнение одним из известных способов, находим искомую величину в точечном виде. При помощи обратного точечного преобразования от точечного изображения искомой величины переходим к «оригиналу», то есть к выражению искомой величины в функции времени.

Рассмотрим расчет гармонического состава выходного напряжения ФПН в режиме холостого хода методом точек. На основании первого и второго законов Кирхгофа можно записать систему дифференциальных уравнений относительно неизвестных первичных токов. В нашем случае таких неизвестных токов два (третий ток может быть определен по первому закону Кирхгофа). Пренебрегая активным сопротивлением обмоток, имеем:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= (L_A + L_S) \frac{di_A}{dt} - (L_B + L_S) \frac{di_B}{dt}, \\ U_{BC} &= (L_C + L_S) \frac{di_A}{dt} + (L_C + L_B + 2L_S) \frac{di_B}{dt}. \end{aligned} \quad (1)$$

Запишем те же уравнения в точечном виде:

$$\begin{aligned} \vec{U}_{AB} &= \omega [J(\overset{v}{L}_A + \overset{v}{L}_S) \vec{i}_A - J(\overset{v}{L}_B + \overset{v}{L}_S) \vec{i}_B], \\ \vec{U}_{BC} &= \omega [J(\overset{v}{L}_C + \overset{v}{L}_S) \vec{i}_A + J(\overset{v}{L}_B + \overset{v}{L}_C + 2\overset{v}{L}_S) \vec{i}_B], \end{aligned} \quad (2)$$

где

$\vec{U}_{AB}$ ,  $\vec{U}_{BC}$ ,  $\vec{U}_{CA}$  — точечные изображения линейных напряжений, подведенных к первичным обмоткам ФПН;

$\vec{i}_A$ ,  $\vec{i}_B$ ,  $\vec{i}_C$  — точечные изображения первичных токов;

$\overset{v}{L}_A, \overset{v}{L}_B, \overset{v}{L}_C$  — точечные изображения нелинейных дифференциальных индуктивностей трансформаторов ФПН;

$\overset{v}{L}_S$  — точечное изображение индуктивности рассеяния;

$J$  — матричный оператор дифференцирования.

Под точечными изображениями токов и напряжений подразумеваются векторы, компонентами которых являются их мгновенные значения внутри рассматриваемого промежутка времени.

Точечное изображение дифференциальной индуктивности представляет из себя диагональную матрицу, компонентами которой являются значения индуктивности при соответствующих мгновенных значениях тока [2].

Вид матрицы дифференцирования определяется характером аппроксимирующего выражения для тока и способом выбора узлов аппроксимации.

В симметричном режиме в первичных токах отсутствуют гармоники, номера которых кратны трем, и аппроксимирующее выражение имеет вид

$$i(\theta) = I_1 \sin \theta + I_5 \sin 5\theta + I_7 \sin 7\theta + I_1' \cos \theta + I_5' \cos 5\theta + I_7' \cos 7\theta. \quad (3)$$

Гармониками более высокого порядка пренебрегаем ввиду их малости. При искажении треугольника линейных напряжений в намагничивающем токе появляются третьи гармоники. В этом случае аппроксимирующий тригонометрический многочлен принимает вид

$$i(\theta) = I_1 \sin \theta + I_3 \sin 3\theta + I_5 \sin 5\theta + I_1' \cos \theta + I_3' \cos 3\theta + I_5' \cos 5\theta. \quad (4)$$

При неучете явления гистерезиса кривая намагничивающего тока бисимметрична, и поэтому можно ограничиться рассмотрением лишь четверти периода основной частоты. Узлы выбираем согласно выражению

$$\theta_K = \frac{\pi}{2n} K, \quad (5)$$

где

$n$  — число узлов ( $n \geq 2p$ ,  $p$  — число учитываемых гармоник).

При известном характере аппроксимирующего выражения и узлах аппроксимации матрица дифференцирования может быть подсчитана по формуле

$$J = W' \cdot [W]^{-1}, \quad (6)$$

где

$W$  — матрица, компонентами которой являются мгновенные значения тригонометрических функций, линейная комбинация которых выбрана для аппроксимации неизвестной несинусоидальной величины. Так, для несимметричного режима матрица будет выглядеть следующим образом:

$$W = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline \sin \theta_1 & \sin 3\theta_1 & \sin 5\theta_1 & \cos \theta_1 & \cos 3\theta_1 & \cos 5\theta_1 \\ \hline \sin \theta_2 & \sin 3\theta_2 & \sin 5\theta_2 & \cos \theta_2 & \cos 3\theta_2 & \cos 5\theta_2 \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hline \sin \theta_n & \sin 3\theta_n & \sin 5\theta_n & \cos \theta_n & \cos 3\theta_n & \cos 5\theta_n \\ \hline \end{array} \end{array} \quad (7)$$

Компонентами матрицы  $W'$  являются соответствующие значения производных от тех же функций.

Подставив (6) в (2), получим матричное уравнение относительно точечных изображений неизвестных токов, порядок которого равен  $2n$ . Решив это уравнение, скажем, методом итераций, находим токи  $i_A$  и  $i_B$  в точечном виде. Первичные фазные напряжения находим при помощи выражений вида:

$$\begin{aligned}\vec{U}_A &= J\omega L_A^v \vec{i}_A; \\ \vec{U}_B &= J\omega L_B^v \vec{i}_B; \\ \vec{U}_C &= J\omega L_C^v \vec{i}_C.\end{aligned}\quad (8)$$

Затем подсчитываются вторичные фазные напряжения и, наконец, определяется точечное изображение напряжения на выходе преобразователя:

$$\vec{U}_{\text{вых}} = (\vec{U}_A + \vec{U}_B + \vec{U}_C)N \quad (9)$$

$$\text{или, с учетом (8): } \vec{U}_{\text{вых}} = J\omega N(L_A^v \vec{i}_A + L_B^v \vec{i}_B + L_C^v \vec{i}_C), \quad (10)$$

где

$N$  — коэффициент трансформации трансформаторов ФПН.

При помощи обратного точечного преобразования находим вектор спектра амплитуд гармоник выходного напряжения

$$\vec{S} = W^{-1} \vec{U}_{\text{вых}}. \quad (11)$$

Матрица  $J$  является постоянной и может быть подсчитана заранее. Весь процесс вычисления гармоник выходного напряжения ФПН может быть выполнен на ЭЦВМ, тем более что для всех рассмотренных матричных операций имеются стандартные подпрограммы. Сопоставление результатов расчета, выполненного на ЭЦВМ «БЭСМ-4», с данными экспериментального исследования ФПН, изготовленного на кафедре электрических станций Томского политехнического института, показало их достаточно близкое совпадение (отклонение не превышает 5—7%). Такая точность является вполне удовлетворительной для практических целей.

Параметры ФПН:  $W_1=760$  вит.,  $W_2=880$  вит.,  $S_{\text{ст}}=1,75 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ,  $l_{\text{ср}}=0,11 \text{ м}$ .

### Выводы

1. Показано, что для расчета гармоник тока и напряжения ФПН в различных режимах может быть использован метод точек.
2. Погрешность расчета при помощи этого метода не превышает 7%.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Бамдас, В. А. Кулинич, С. В. Шапиро. Статические электромагнитные преобразователи частоты и числа фаз. ГЭИ, 1961.
2. Б. А. Борковский. К расчету периодических процессов в нелинейных электрических цепях с выпрямителями. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Таганрог, 1955.
3. К. А. Круг. Основы электротехники. ОНТИ, 1936.

4. Ю. А. Кулага. Расчет выходных величин ферромагнитного преобразователя. Томский ЦНТИ, информационный листок № 6, 1970.
5. 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.
6. В. Ю. Ломоносов. Периодические процессы в нелинейных цепях. «Электричество», № 7, 1952.
7. Л. Л. Рожанский. Статические электромагнитные преобразователи частоты. ГЭИ, 1959.