

## К РАСЧЕТУ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СИНУСОИД

Д. С. Балыко

*Учреждение образования Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель В. В. Соленков

Точный анализ процессов в нелинейных электрических цепях переменного тока с учетом несинусоидальности кривых напряжений и токов, как известно, представляет значительные трудности. Поэтому при расчете устройств, содержащих индуктивные катушки с ферромагнитными сердечниками (стабилизаторов напряжения, трансформаторов, усилителей мощности и т. п.) применяют метод эквивалентных синусоид, согласно которому действительные несинусоидальные кривые напряжения и тока заменяют эквивалентными синусоидами [1], [2]. Это позволяет использовать для суммирования характеристик нелинейных активных и реактивных элементов законы Кирхгофа в комплексной форме записи, а также векторные диаграммы.

Кроме того, для простоты рекомендуется считать, что индуктивные катушки с ферромагнитными сердечниками не имеют потерь, т. е. угол сдвига фаз между эквивалентными синусоидами напряжения и тока катушек  $\varphi_k = 90^\circ$ . Последнее упрощение, на наш взгляд, не является обязательным, поскольку зависимость  $\varphi_k(I)$ , как и вольтамперная характеристика  $U_k(I)$ , могут быть достаточно просто определены, например, экспериментальным путем.

В докладе рассмотрены примеры использования метода эквивалентных синусоид для анализа процессов в стабилизаторах переменного напряжения с учетом потерь мощности в индуктивных катушках с ферромагнитными сердечниками.

Основная часть большинства стабилизаторов, как известно [1], состоит из двух последовательно соединенных сопротивлений – линейного и нелинейного. В простейшем ферромагнитном стабилизаторе (рис. 1) в качестве линейного сопротивления используется конденсатор емкостью  $C$ . Последовательно с ним соединена нелинейная катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником. Напряжение сети  $U_1$  подается на зажимы всей цепи, а выходное стабилизированное напряжение  $U_2$  снимается с зажимов катушки, т. е.  $U_k = U_2$ .

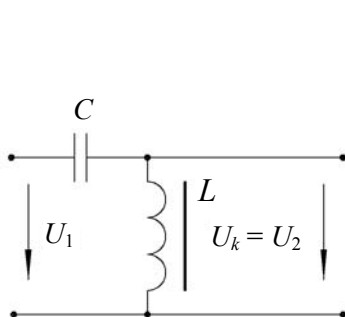


Рис. 1

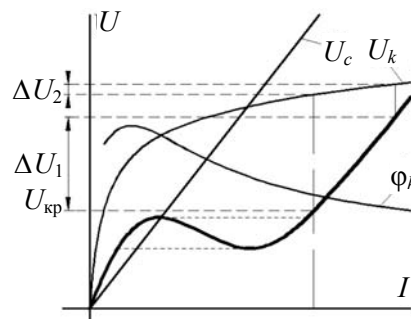


Рис. 2

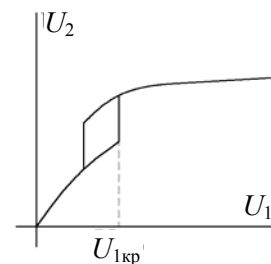


Рис. 3

Как известно [2], [3], качество работы стабилизатора характеризуется коэффициентом стабилизации

$$k_{ст} = \frac{\Delta U_{10}}{\Delta U_{20}},$$

где  $\Delta U_{10}$  и  $\Delta U_{20}$  – относительное изменение напряжения на входе и на выходе стабилизатора соответственно. Следовательно, для оценки качества стабилизации устройства необходимо по известным характеристикам  $U_c(I)$ ,  $U_k(I)$  и  $\varphi_k(I)$  построить зависимость  $U_1(I)$ . Для этого следует задать несколько значений тока  $I$ , каждому из которых соответствуют комплексные напряжения  $\underline{U}_c = U_c e^{-j90^\circ}$  и  $\underline{U}_k = U_k e^{j\varphi_k}$ . Суммируя их, нетрудно получить

$$U_1 = |\underline{U}_c + \underline{U}_k|.$$

Анализ кривых  $U_1(I)$  и  $U_2(I) = U_k(I)$  (рис. 2) показывает, что значительное изменение напряжения сети  $\Delta U_1$  влечет за собой малое изменение выходного напряжения  $\Delta U_2$ . Об этом же свидетельствует зависимость  $U_2(U_1)$  (рис. 3). Следовательно, рассмотренная схема может быть использована для стабилизации напряжения  $U_2$ . Вместе с тем, ей присущ ряд недостатков (значительный ток  $I_0$  в начале зоны стабилизации; наличие скачков стабилизируемого напряжения и тока; ограниченность зоны стабилизации и др.), которые затрудняют ее практическое применение.

Более перспективной является схема (рис. 4), в которой катушка с ненасыщенным ферромагнитным сердечником и параметрами  $R_1, L_1$  исполняет роль линейного сопротивления. Катушка с насыщенным ферромагнитным сердечником и конденсатор емкостью  $C$ , соединенные параллельно, образуют эквивалентный нелинейный элемент, с зажимов которого снимается стабилизированное напряжение  $U_2$ .

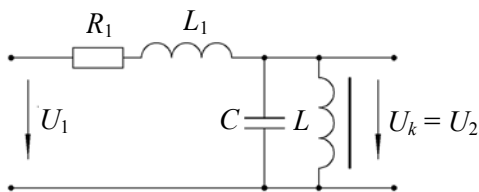


Рис. 4

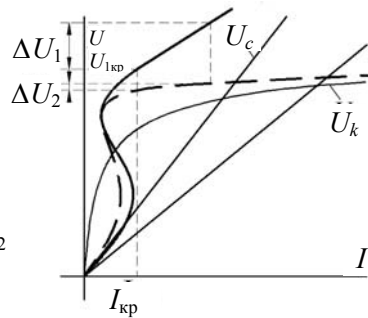


Рис. 5

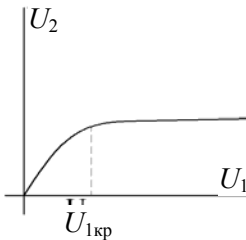


Рис. 6

Расчет вольтамперной характеристики  $U_1(I_1)$  в режиме холостого хода ведется в следующем порядке. Задаются несколько значений напряжения  $U_2$ , каждому из которых соответствуют комплексные токи  $\underline{I}_c = I_c e^{j90^\circ}$  и  $\underline{I}_k = I_k e^{-j\varphi_k}$ . При этом значения  $I_c, I_k$  и  $\varphi_k$  определяются по характеристикам  $U_c(I_c)$ ,  $U_k(I_k)$  и  $\varphi_k(I_k)$ . Далее, суммируя  $\underline{I}_c$  и  $\underline{I}_k$ , можно получить

$$\underline{I}_1 = I_1 e^{j\psi_1} = \underline{I}_c + \underline{I}_k.$$

Определив ток  $I_1$  для различных значений  $U_2$ , строим характеристику  $U_2(I_1)$ . Наконец, суммируя падение напряжения на линейной катушке с напряжением  $\underline{U}_2$  в виде

$$\underline{U}_1 = (R_1 + j\omega L_1)I_1 + \underline{U}_2 = U_1 e^{j\omega t_1},$$

нетрудно определить значения напряжения  $U_1$ , соответствующие значениям тока  $I_1$ , и далее построить характеристики  $U_1(I_1)$  (рис. 5) и  $U_2(U_1)$  (рис. 6). Их анализ свидетельствует о том, что и в схеме (рис. 4) при значительном изменении входного напряжения  $\Delta U_1$  стабилизированное напряжение  $U_2$  изменяется мало. При подключении нагрузки к выходным зажимам стабилизатора характеристика  $U_2(U_1)$  становится менее полой, что уменьшает коэффициент стабилизации устройства.

Произведенные расчеты и экспериментальные исследования показали, что предложенная методика позволяет повысить точность расчета и построения характеристик нелинейных цепей переменного тока с ферромагнитными элементами и, в конечном итоге, способствует повышению качества исследования процессов, происходящих в таких цепях.

#### Литература

1. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники : учеб. для вузов / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – Л. : Энергоиздат, 1981. – Т. 2. – 416 с.
2. Основы теории цепей : учеб. для вузов / Г. В. Зевеке [и др.]. – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
3. Каплянский, А. Е. Теоретические основы электротехники / А. Е. Каплянский, А. П. Лысенко, Л. С. Полотовский. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 527 с.