

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА МЕТОДОМ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

А. О. Внукова

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

Научный руководитель В. В. Соленков

Известно, что в трансформаторах, электрических машинах, устройствах автоматики и вычислительной техники применяются магнитомягкие материалы, гистерезисные петли которых имеют малые площади, а основная кривая намагничивания – круто изменяющийся характер.

Расчет электрических цепей переменного тока, содержащих индуктивные катушки с сердечниками из упомянутых материалов, обычно производят с помощью метода кусочно-линейной аппроксимации [1], [2]. При этом для облегчения расчетов основную кривую намагничивания заменяют (аппроксимируют) идеальной прямоугольной, линейные участки которой совпадают с осями координат (рис. 1, а).

При перемагничивании сердечника катушки изменяется только индукция B (от $-B_m$ до $+B_m$), а в намагниченном состоянии – только напряженность H .

Так как потокосцепление Ψ пропорционально индукции B в сердечнике ($\Psi = wsB$, где w – число витков катушки; s – сечение сердечника), а ток i – напряженности H магнитного поля (по закону полного тока $i = \frac{l}{w} H$, где l – длина средней силовой линии поля в сердечнике), то вебер-амперная характеристика индуктивной катушки качественно повторит основную кривую намагничивания $B(H)$ (рис. 1, б).

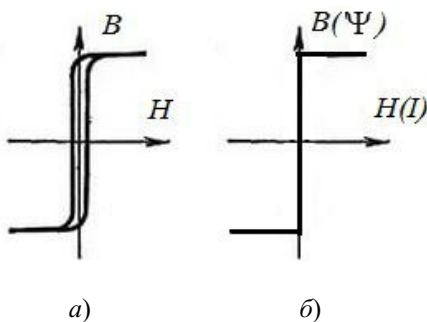


Рис. 1. Петля гистерезиса магнитомягкого материала и аппроксимированная основная кривая намагничивания

В настоящем докладе рассмотрены особенности расчета цепи с упомянутыми выше индуктивными катушками при периодическом напряжении, отличающемся от гармонического.

В схеме на рис. 2 параллельно с индуктивной катушкой включено нелинейное активное сопротивление с симметричной ВАХ.

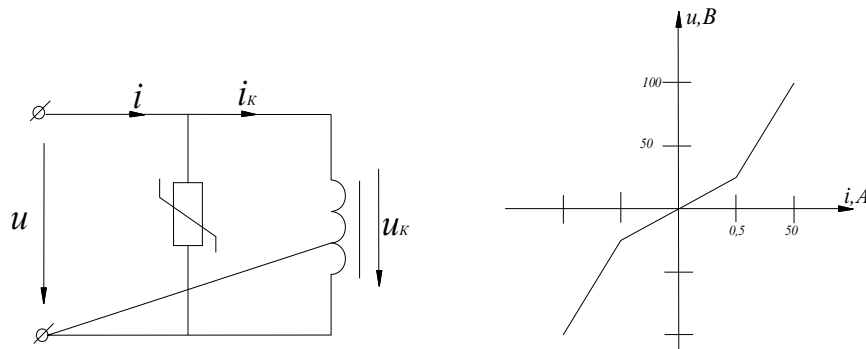


Рис. 2. Схема электрической цепи и вольт-амперная характеристика нелинейного активного сопротивления

Если по сопротивлению протекает синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, напряжение на этом сопротивлении, равное напряжению на катушке, можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} u_1(\omega t) &= U_{m1} \sin \omega t = r_{д1} I_m \sin \omega t && \text{при } 0 \leq \omega t \leq \omega t_1 \\ & && \text{и } \pi - \omega t_1 \leq \omega t \leq \pi; \\ u_2(\omega t) &= U_{m2} \sin \omega t - U_0 = r_{д2} I_m \sin \omega t - U_0 && \text{при } \omega t_1 \leq \omega t \leq \pi - \omega t_1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $r_{д1} = \Delta u_1 / \Delta i_1$ и $r_{д2} = \Delta u_2 / \Delta i_2$ – дифференциальные сопротивления нелинейного резистора; $\omega t_1 = \arcsin i_{из} / I_m$ – угол, соответствующий точке излома ВАХ нелинейного резистора.

Пусть перемагничивание сердечника катушки заканчивается в момент времени, соответствующий углу ωt_2 . Тогда в интервале $0 \leq \omega t \leq \omega t_2$ напряжение на катушке будет равно:

$$u_k = \frac{d\Psi}{dt}, \quad (2)$$

откуда

$$\Psi(t) = \int_0^t u_k dt + C, \quad (3)$$

где C – постоянная интегрирования, характеризующая состояние катушки в момент, когда $\omega t = 0$; как и ранее можно принять, что $C = -\Psi_m$.

С учетом (1) равенство (3) можно преобразовать к виду:

$$\Psi(\omega t) = \frac{1}{\omega} \int_0^{\omega t_1} u_1(\omega t_1) d\omega t + \frac{1}{\omega} \int_{\omega t_1}^{\omega t} u_2(\omega t) d\omega t - \Psi_m =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{\omega} \int_0^{\omega t_1} U_{m1} \sin \omega t d\omega t + \frac{1}{\omega} \int_{\omega t_1}^{\omega t} [U_{m2} \sin \omega t - U_0] d\omega t - \Psi_m = \\
&= -\frac{U_{m2}}{\omega} \cos \omega t - U_0 t + \Psi^* - \Psi_m,
\end{aligned} \tag{4}$$

где $\Psi^* = -\frac{U_{m1}}{\omega} \cos \omega t_1 + \frac{U_{m1}}{\omega} + \frac{U_{m2}}{\omega} \cos \omega t_1 + U_0 t_1$.

Для определения ωt_2 воспользуемся равенством (4), учитывая, что при $\omega t = \omega t_2$ потокосцепление $\Psi(\omega t) = \Psi_m$.

Получим:

$$-\frac{U_{m2}}{\omega} \cos \omega t - U_0 t + \Psi^* - 2\Psi_m = 0. \tag{5}$$

Последнее уравнение является трансцендентным и точного аналитического решения не имеет. Величина ωt_2 может быть определена численным методом либо с применением ЭВМ.

В интервале $\omega t_2 \leq \omega t \leq \pi$:

$$\Psi(\omega t) = \Psi_m, \quad u_k = \frac{d\Psi_m}{dt} = 0 \quad \text{и} \quad i_k = I_m \sin \omega t.$$

Возможный характер изменения потокосцепления Ψ , тока i и напряжения u_k на катушке показан на рис. 3.

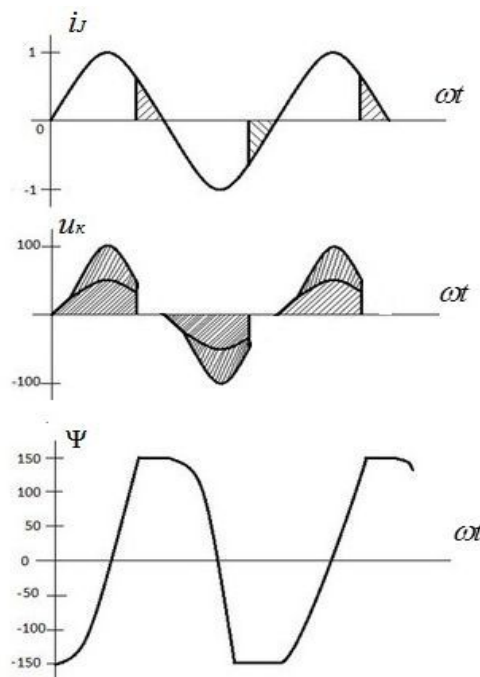


Рис. 3. Кривые тока $i(\omega t)$, напряжения $u_k(\omega t)$ и потокосцепления $\Psi(\omega t)$

Л и т е р а т у р а

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учеб. для электротехн., энергет., приборостроит. специальностей вузов / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1996.
2. Бессонов, Л. А. Нелинейные электрические цепи : учеб. пособие для втузов / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1977.