

УДК 621.372.061.3

К.Зайдель, Ф.Працны, Т.Т.Розум

РАСЧЕТ ТОКОВ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА  
ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ НЕНАГРУЖЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В настоящей работе предлагается методика расчета переходного процесса как результат наложения на установившийся режим нелинейной, отличной от экспоненты, затухающей во времени свободной составляющей, которая рассчитывается аналитически или с помощью направленного графа. Такая методика расчета по составляющим позволяет при малом объеме вычислений получить огибающую переходного режима или построить график мгновенных значений.

Для расчета переходного процесса при включении ненагруженного трансформатора к источнику синусоидального напряжения необходимо решить нелинейное дифференциальное уравнение

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = p\psi + ri, \quad (1)$$

где  $p = \frac{d}{dt}$  - оператор дифференцирования.

Нелинейную зависимость  $i(\psi)$  аппроксимируем уравнением  $i = \alpha \operatorname{sh} \beta \psi$  или в относительных единицах [2]  $i = \operatorname{sh} \psi$  (в дальнейшем все соотношения и расчеты приводятся в относительных единицах).

Принимаем решение уравнения (1) в виде

$$\psi = a + \psi_m \sin(t + \alpha - \varphi) = a + \psi_m \sin(t + \xi), \quad (2)$$

где  $a$  - изменяющаяся во времени свободная составляющая потокосцепления (отличная от экспоненты);  $\psi_m$  - амплитуда I гармоники потокосцепления в установившемся режиме;  $\xi$  - начальная фаза I гармоники потокосцепления в установившемся режиме.

Тогда

$$p\psi = pa + \psi_m \cos(t + \xi). \quad (3)$$

Разложим гиперболический синус суммы (2) в ряд Фурье. Коэффициенты членов ряда выражаются функциями Бесселя различных порядков от чисто мнимого аргумента [1]:

$$i = \text{sh } \Psi = \text{sh } a J_0(j\Psi_m) + \text{cha} [-2jJ_1(j\Psi_m)] \sin(t+\xi_1) + \\ + \text{sha} [2J_2(j\Psi_m)] \cos(2t+\xi_2) + \\ + \text{cha} [-2jJ_3(j\Psi_m)] \sin(3t+\xi_3)$$

или

$$i = b + \text{cha} I_{m1} \sin(t+\xi) + \text{sha} I_{m2} \cos(2t+\xi_2) + \\ + \text{cha} I_{m3} \sin(3t+\xi_3), \quad (4)$$

где  $b = \text{sha} J_0(j\Psi_m)$  - затухающая во времени свободная составляющая тока;  $I_{m1} = -2jJ_1(j\Psi_m)$ ,  $I_{m3} = -2jJ_3(j\Psi_m)$  - амплитуды I и III гармоник тока установившегося режима.

После подстановки (3) и (4) в (1) с учетом двух первых членов ряда (4) получаем

$$U_m \sin t \cos \alpha + U_m \cos t \sin \alpha = pa + \Psi_m \cos t \cos \xi - \\ - \Psi_m \sin t \sin \xi + rb + rI_{m1} \text{cha} \sin t \cos \xi + \\ + rI_{m1} \text{cha} \cos t \sin \xi. \quad (5)$$

Приравнявая коэффициенты при  $\sin t$ ,  $\cos t$  и свободные члены, уравнение (5) разбиваем на три уравнения:

$$\left. \begin{aligned} U_m \cos \alpha &= -\Psi_m \sin \xi + rI_{m1} \text{cha} \cos \xi; \\ U_m \sin \alpha &= \Psi_m \cos \xi + rI_{m1} \text{cha} \sin \xi; \\ 0 &= pa + rb. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для определения характеристик установившегося режима  $\Psi_m$ ,  $I_m$ ,  $\xi$  решаем систему уравнений (6) при  $t = \infty$ , когда  $a = 0$ ,  $b = 0$ . Возведем в квадрат и сложим первые два уравнения, в результате получим

$$\Psi_m = \sqrt{U_m^2 - r^2 [-2jJ_1(j\Psi_m)]^2}; \quad (7)$$

$$\xi = \operatorname{arctg} \frac{r I_{m1} \operatorname{tg} \alpha - \psi_m}{r I_{m1} + \psi_m \operatorname{tg} \alpha} . \quad (8)$$

Здесь  $I_{m1} = -2jJ_1(j\psi_m)$ . Уравнение (7) решается методом последовательных приближений.

Таким образом, выполнен расчет установившегося режима исследуемой цепи по I и III гармоникам. Переходный процесс обусловлен наложением на установившийся режим некоторого нелинейного искажения, условно названного нами свободной составляющей потокосцепления  $a$  и тока  $b$ , подобно линейным цепям. Решения для этих составляющих находим из последнего уравнения системы (6), которое является уравнением с разделяющимися переменными

$$\frac{da}{sha} = -rJ_0(j\psi_m) dt.$$

После интегрирования получаем

$$\ln \left| \operatorname{th} \frac{a}{2} \right| = -rJ_0(j\psi_m) \cdot t + c.$$

Постоянную интегрирования определяем из начальных условий

$$\psi \Big|_{t=0} = \psi_0; \quad \psi_0 = a_0 + \psi_m \sin \xi; \quad a_0 = \psi_0 - \psi_m \sin \xi.$$

Откуда

$$c = \ln \left| \operatorname{th} \frac{a_0}{2} \right| = \ln \left| \operatorname{th} \frac{\psi_0 - \psi_m \sin \xi}{2} \right|.$$

При отсутствии остаточного намагничивания ( $\psi_0 = 0$ ):

$$\ln \left| \operatorname{th} \frac{a}{2} \right| = -rJ_0(j\psi_m) \cdot t + \ln \left| \operatorname{th} \left( -\frac{1}{2} \psi_m \sin \xi \right) \right|.$$

После потенцирования

$$a = 2 \operatorname{Arth} \left[ e^{-rJ_0(j\psi_m) \cdot t} \cdot \operatorname{th} \left( -\frac{1}{2} \psi_m \sin \xi \right) \right]. \quad (9)$$

Аналитическое решение (9) всегда желательно, но возможно лишь для простейших цепей. Так как рассмотренная методика расчета по составляющим принципиально может быть распространена для анализа многих электромагнитных устройств, то предлагается еще один вариант расчета свободных составляющих с помощью направленного графа [3]. Этот вариант принципиально приемлем для любой цепи. Направленный граф рассмотренного режима трансформатора строится в соответствии с последним уравнением системы (6) и приведен на рис. 1. Весь переходный процесс разбивается на ряд интервалов и определяются значения  $a$  и  $b$  на каждом интервале. Расчетная схема строится на основе графа [4].

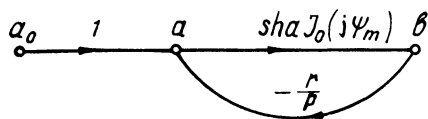


Рис. 1.

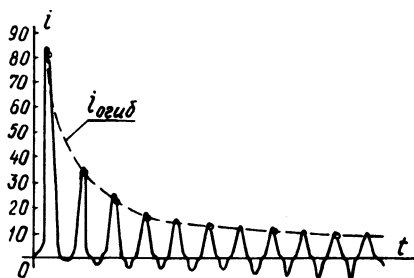


Рис. 2.

Огибающие переходного процесса получаем как

$$\Psi_{\text{огиб}} = a \pm \Psi_m; i_{\text{огиб}} = b \pm \text{ch } a I_{m1} \pm \text{sh } a I_{m2} \pm \text{ch } a I_{m3} \quad (10)$$

(с целью повышения точности в уравнении  $i_{\text{огиб}}$  учтены высшие гармоники). Кривые мгновенных значений могут быть построены графически согласно уравнениям (2) и (4).

По предложенной методике проведены расчеты переходных процессов при включении ненагруженного трансформатора на напряжение  $u = 3 \sin t$ ;  $r = 0,01$ . На рис. 2 представлена кривая тока переходного режима, рассчитанная методом последовательных интервалов с итерацией на каждом шаге; удовлетворительная стоимость итераций обеспечивалась при интервале  $\Delta t = 0,5$ . Штриховой линией изображена огибающая переходного процесса, полученная на основании уравнений (7) – (10). Использование предложенной методики расчета позволило значительно сократить объем вычислений и упростить схему расчета. Для построения огибающей выпол-

нены расчеты лишь семи точек. Погрешность расчета огибающей в сравнении с кривой мгновенных значений не превышает 10%.

Таким образом, рассмотренная методика определения макроструктуры переходных процессов приемлема для практических расчетов, так как проста и позволяет быстро получить результат при небольшом объеме вычислений и достаточно высокой точности, а также может быть использована для расчета более сложных цепей.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бамдас А.М., Кулинич В.А., Шапиро С.В. Статические электромагнитные преобразователи частоты и числа фаз. – М., 1961. 2. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. – М., 1969. 3. Робишо Л., Буавер М., Робер Ж. Направленные графы и их приложение к электрическим цепям и машинам. – М. – Л., 1964. 4. Розум Т.Т. Использование направленных графов при расчете переходных процессов в магнитном усилителе по огибающим основной гармонике. – Изв. вузов СССР. Сер. Энергетика, 1977, №10.

УДК 621.314.572

О.П.Ильин, В.П.Беляев, О.А.Головач

### АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ ШИМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Из известных способов регулирования переменного напряжения в тиристорных схемах наиболее распространенным является способ фазового управления углом отпирания тиристорных. Основное его преимущество заключается в их естественной коммутации. Однако неудовлетворительное качество гармонического состава токов и напряжений на выходе такого преобразователя приводит к известным недостаткам [1]. В работе [2] предлагается ШИМ кривых переменного напряжения с частотой коммутации  $f_k$  большей частоты сети  $f_c$ , причем  $f_k = 2mf_c$ , где  $m = 1, 2, 3, \dots$ . Однако при  $m = 2, 4, 6$  и т.д. выходные напряжения и токи будут содержать гармоники, кратные трем. Токи этих гармоник, не участвуя в создании момента при питании асинхронного двигателя от тиристорного регулятора, дают дополнительные потери энергии, снижая КПД и коэффициент мощности системы. Если рас-