

УДК 621.316,3

## ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ КОММУТАЦИИ ТОКА ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКИ ИЗ ОДНОЙ ГРУППЫ ВЕНТИЛЕЙ В ДРУГУЮ

В. В. ИВАШИН, Э. Г. ФУРМАН

При возбуждении электромагнитов ускорителей в установках для термоядерных исследований возникает необходимость получения магнитного цикла со сложным законом изменения во времени. В колебательных  $LC$  контурах такие поля получаются путем искусственной коммутации тока индуктивной нагрузки из цепи разряда накопительного конденсатора в цепь перезаряда или путем отключения индуктивной нагрузки от накопителя с последующим ее закорачиванием и т. д. [1, 2]. При этом требуется обеспечивать условия для нормальной работы управляемых коммутирующих приборов по скорости нарастания тока и времени восстановления управляющих свойств.

В [1, 2] рассмотрены индивидуальные схемы емкостей коммутации в мощных  $LC$  контурах при формировании в них тока треугольной, синусоидальной и трапецеидальной форм. В таких схемах для искусственного обесточивания каждого из управляемых приборов в контуре  $LC$  требуется дополнительный управляемый прибор.

В данной работе рассматривается схема с применением многообмоточного трансформатора, пригодная для емкостей искусственной коммутации одновременно нескольких коммутирующих приборов, в том числе и для тех случаев, когда эти приборы не имеют общих точек по анодам и катодам. Такое решение повышает надежность работы схемы в целом за счет уменьшения общего числа управляемых приборов и исключения некоторых аварийных режимов. Трансформатор целесообразно выполнять с подмагничиванием и проводить выбор его параметров с учетом насыщения магнитопровода и рядом специфических особенностей работы схемы.

Рассмотрим работу схемы на примере коммутации приборов в контуре с формированием в индуктивности  $L$  импульсов тока треугольной формы (рис. 1). Накопительный конденсатор  $C$  через тиристоры  $T_1$ ,  $T_1^1$  и диоды  $D_1$ ,  $D_1^1$  соединен с электромагнитом  $L$ . Последовательно с диодами включены вторичные обмотки коммутирующих трансформаторов  $Tr_1$ ,  $Tr_2$ , первичные обмотки которых соединены последовательно и через тиристор  $T_2$  подключены к коммутирующему конденсатору  $C_1$ . Магнитопроводы трансформаторов подмагничиваются током электромагнита  $L$ , протекающим по обмоткам  $W_3$ . Конденсатор  $C_1$  имеет перезарядную цепь из диода  $D_2$  и индуктивности  $L_1$ . Суть формирования импульсов тока треугольной формы заключается в искусственном скачкообразном

переводе контура из режима, соответствующего углу  $\omega tk$ , в режим, соответствующий углу  $\pi - \omega tk$  (рис. 1,б). Для этого необходимо выключить тиристоры  $T_1, T_1^1$  и включить диоды  $D_1, D_1^1$ . К моменту  $t_1$  ток электромагнита замкнут по контуру: конденсатор  $C$ , тиристор  $T_1$ , обмотка подмагничивания  $W_3$  трансформатора  $Tr_1$ , электромагнит  $L$ , обмотка подмагничивания  $W_3$  трансформатора  $Tr_2$ , тиристор  $T_1^1$ . При этом магнитное состояние трансформаторов характеризуется точкой  $A$  на рис. 3. Накопительный конденсатор  $C$  и коммутирующий конденсатор  $C_1$  заряжены соответственно до напряжений  $U_2$  и  $U_1$ . В момент времени  $t_1$  включается тиристор  $T_2$  и коммутирующий конденсатор  $C_1$  подключается к первичным обмоткам трансформаторов  $Tr_1$  и  $Tr_2$ . Под действием наведенной во вторичных обмотках  $W_2$  э.д.с. ток в диодах  $D_1$  и  $D_1^1$  начинает нарастать, а ток тиристоров  $T_1$  и  $T_1^1$  уменьшается так, что сумма токов  $i_T$  и  $i_D$  обоих узлов за время коммутации  $t_{\gamma}$  на рис. 2 равна току индуктивной нагрузки

$$i_{\gamma} = \frac{I_m \cdot L_k}{U_{W_2} - U_2}, \quad (1)$$

где  $U_{W_2}$  — напряжение, наведенное во вторичной обмотке коммутирующего трансформатора;  $L_k$  — эквивалентная индуктивность цепи разряда емкости  $C$  с учетом приведенных индуктивностей вторичных цепей с диодами, тиристорами и конденсатором  $C_1$ .

Для упрощения анализа электромагнитных процессов в схеме рассмотрим работу одного коммутирующего узла. С момента времени  $t_2$  (рис. 2) коммутирующий конденсатор  $C_1$  разряжается током

$$i_{C_1}(t) = I_m \cdot W_2 / W_1 + i_{\mu}, \quad (2)$$

где  $i_{\mu}$  — ток намагничивания трансформатора. Если не учитывать незначительное изменение тока электромагнита при разряде коммутирующего конденсатора и пренебречь величиной тока намагничивания трансформатора, то можно определить прикладываемое к тиристорам обратное напряжение

$$U_T(t) = U_1 \cdot W_2 / W_1 - U_2 + \left[ \frac{I_m}{C} - \frac{I_m \cdot W_2^2}{W_1^2 \cdot C_1} \right] (t + t_{\gamma}). \quad (3)$$

Приравняв  $U_T(t) = 0$ , определим время, которое отводится тиристорам для восстановления вентиляльных свойств (рис. 2)

$$t_{в.т.} = \frac{U_1 \cdot W_2 / W_1 - U_2}{I_m \cdot W_2^2 / W_1 \cdot C_1 - I_m / C} - t_{\gamma}. \quad (4)$$

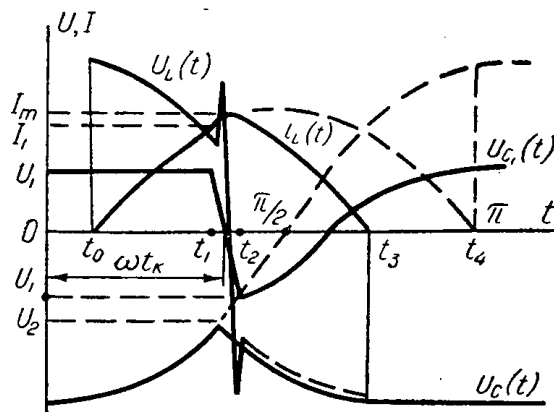
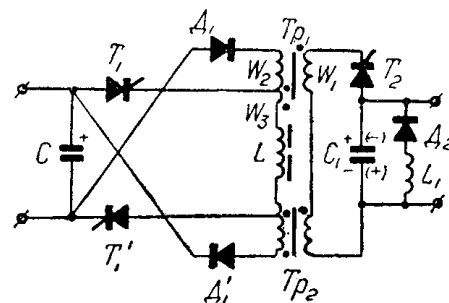


Рис. 1. Схема питания электромагнита импульсами тока треугольной формы.

Под действием положительного напряжения коммутирующего конденсатора, прикладываемого к первичной обмотке трансформатора, его сердечник за время  $t_3-t_1$  перемагничивается от  $B_1$  до  $-B_2$ . При нулевом напряжении конденсатора  $C_1$  магнитное состояние сердечника характеризуется точкой  $D$  на рис. 3. В интервале времени  $t_4-t_3$  коммутирующий конденсатор перезаряжается, а сердечник трансформатора перемагничивается от индукции  $-B_2$  до  $+B_m$  (рис. 3). В момент времени  $t_4$  сердечник трансформатора насыщается, и тиристор  $T_2$  выключается.

При симметричном перемагничивании сердечника трансформатора от  $+B_m$  до  $-B_m$  и обратно от  $-B_m$  до  $+B_m$  начальное и конечное напряжения на коммутирующем конденсаторе  $C_2$  равны, т. е. энергия  $LC$  контура при разряде конденсатора увеличивается, а при перезаряде уменьшается на величину энергии, запасенной в коммутирующем конденсаторе.

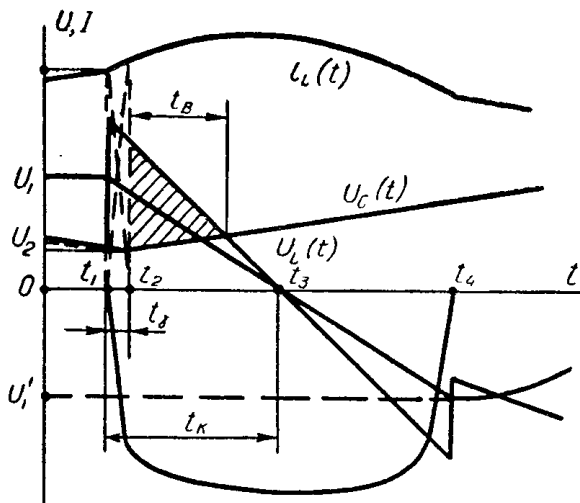


Рис. 2. Кривые тока и напряжений в схеме за время коммутации тока из тиристора в диод

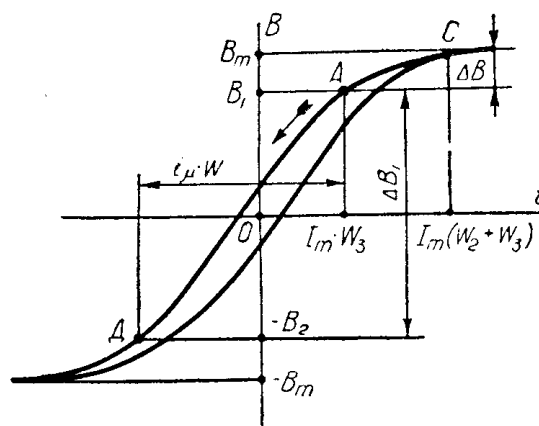


Рис. 3

Если перемагничивание сердечника несимметрично, как это показано на рис. 3, то индукция в точке  $A$  кривой намагничивания будет меньше индукции насыщения, а начальное и конечное напряжения на коммутирующем конденсаторе будут различны. Конечное напряжение на конденсаторе  $C_2$  пропорционально отношению изменения индукции, т. е.

$$U_1^1 = U_1(\Delta B_1 + \Delta B) / \Delta B_1. \quad (5)$$

Индукцию  $B_1$  в сердечнике трансформатора выбирают из условия, чтобы при перезаряде конденсатора  $C_1$  через  $L_1$  и  $D_2$  (рис. 1) конечное напряжение на конденсаторе было равно требуемому значению напряжения на нем до коммутации. Величину индукции, на которую сердечник трансформатора должен быть подмагничен, можно определить из условия

$$B_1 = B_m \cdot e^{-b/2}, \quad (6)$$

где  $b$  — коэффициент затухания контура перезаряда  $C_1$ ,  $L_1$ ,  $D_2$ .

Конструктивный параметр, определяющий размеры трансформатора, будет

$$W_1 \cdot S = \frac{\Psi^2}{B_1 + B}, \quad (7)$$

где  $S$  — сечение стали магнитопровода сердечника,  $\Psi$  — потокосцепление трансформатора, равное

$$\Psi = \int_{t_1}^{t_3} U_1(t) dt \approx \frac{I_m \cdot W_1 \cdot t_k^2}{2 \cdot W_2 \cdot C_1}. \quad (8)$$

Конструктивный расчет трансформатора проводится по известным методикам расчета импульсных трансформаторов, например [3]. При размещении на трансформаторе нескольких вторичных обмоток необходимо определять ток разряда емкости  $C$  по (2) с учетом этого фактора, а также учитывать индуктивности всех вторичных контуров при определении  $t\gamma$  в (1) и т. д. по известным соотношениям. Следует отметить, что в рассмотренном методе коммутации насыщение трансформаторов в момент  $t_4$  предотвращает возникновение перенапряжений в схеме.

### Выводы

1. Рассмотренный метод емкостной искусственной коммутации тока индуктивной нагрузки из одной группы вентилях в другую через разделительный трансформатор с помощью одной коммутирующей конденсаторной батареи позволяет коммутировать токи одновременно в ряде групп приборов, не имеющих общих точек анод — катод.

2. Полученные основные расчетные соотношения позволяют провести инженерный расчет коммутирующего узла.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Ивашин, Г. А. Сипайлов. ПТЭ, 1966, № 5, 151.
  2. В. В. Ивашин. Диссертация. Томск, 1968.
  3. Я. С. Ицхоки. Импульсные устройства. Госэнергоиздат, 1958.
-