

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТОКА  
В ОБМОТКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ,  
СНАБЖЕННОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ КОЛЛЕКТОРОМ,  
ОТ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ И ЧАСТОТЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КОЛЛЕКТОРА**

Э. Ф. ОБЕРГАН, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

В настоящей статье приводится часть результатов исследования электромашинного преобразователя с полупроводниковым коллектором в цепи возбуждения, используемым в целях изменения в широких пределах частоты выходного напряжения при постоянстве скорости вращения вала машины.

Характер поведения тока в обмотке электрической машины, снабженной полупроводниковым коллектором, в зависимости от числа выводов и параметров обмотки при различных частотах переключения ячеек коллектора представляет самостоятельный интерес.

Поэтому решение поставленной задачи в настоящей статье производится без учета влияния на ток в обмотке возбуждения остальных цепей и режимов работы электрической машины в целом.

В качестве обмотки возбуждения электрической машины выбрана равномерно распределенная по пазам статора обмотка якорного типа. Выводы от секций обмотки соединены с ячейками полупроводникового коллектора, выполненного по кольцевой схеме на управляемых полупроводниковых вентилях с питанием от источника постоянного тока.

На рис. 1 показана часть полупроводникового коллектора, соединенная с двумя диаметрально расположенными секциями обмотки.

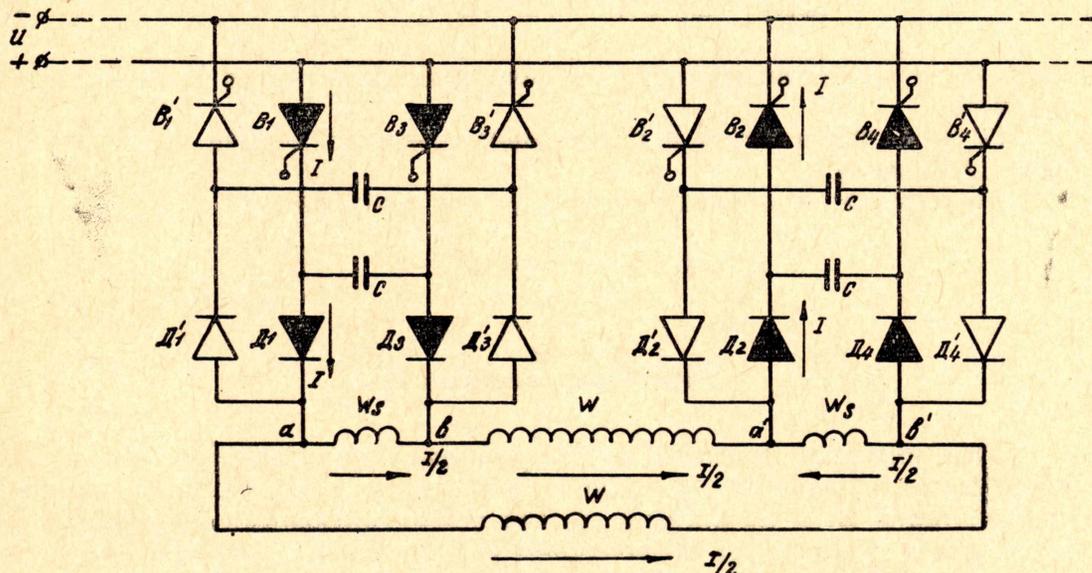


Рис. 1. Электрическая схема двух ячеек полупроводникового коллектора, связанных с диаметрально расположенными секциями обмотки.

Обозначения на рис. 1:  $W$  — часть параллельной ветви обмотки возбуждения,  $W_s$  — секция или часть обмотки между выводами,  $U$  и  $I$  — напряжение питания и ток через обмотку,  $V$  — управляемые вентили (тиристоры),  $D$  — диоды,  $C$  — коммутирующие конденсаторы.

Для удобства рассмотрения процесса коммутации тока в обмотке полупроводниковым коллектором, разобьем цикл коммутации тока в одной секции на два интервала времени:

$t_3$  — интервал времени замкнутого состояния секции и

$t_p$  — интервал времени после размыкания замкнутой секции.

До начала подачи управляющих импульсов на тиристоры обмотка соединена с источником постоянного тока через открытые тиристоры  $V_1$  и  $V_2$  ячеек коллектора, связанных с диаметрными выводами обмотки.

При этом в параллельной ветви обмотки протекает ток.

$$i_0 = \frac{I}{2} = \frac{U}{R_0}. \quad (1)$$

Здесь  $R_0 = r_1 + r_2$  — омическое сопротивление параллельной ветви обмотки, а  $r_2$  — сопротивление секции  $W_s$ .

### Интервал времени $t_3$

Этот интервал времени, в котором работают тиристоры  $V_1, V_2, V_3, V_4$ , исчисляется от момента открывания тиристоров  $V_3$  и  $V_4$  при подаче управляющего импульса до момента запираания тиристоров  $V_1$  и  $V_2$ .

Вследствие того, что в этом интервале времени к секции  $W_s$  не приложены внешние э. д. с., электромагнитная энергия секций  $W_s$  рассеивается, и ток  $i_0$ , протекавший в секции при  $t_3=0$ , изменяется по экспоненциальному закону

$$i_{w_s}(t) = i_0 \cdot e^{-\frac{r_1+r_2}{L_2} \cdot t_3}, \quad (2)$$

здесь  $L_2$  — индуктивность секции  $W_s$ ,  $i_{w_s}(t)$  — ток в секции  $W_s$  в интервале времени  $t_3$ .

Ток в остальной части параллельной ветви  $W$  при этом возрастает, изменяясь по закону:

$$i_w(t) = i_0 \left[ 1 + \frac{r_2}{r_1} \left( 1 - e^{-\frac{r_1}{L_1} \cdot t_3} \right) \right], \quad (3)$$

здесь  $r_1$  и  $L_1$  — сопротивление и индуктивность части параллельной ветви  $W$ .

$i_w(t)$  — ток в части параллельной ветви без секции  $W_s$  в интервале времени  $t_3$ .

Максимальное значение тока  $i_w$  при  $t_3 = \infty$  равно

$$i_w = i_0 \cdot \frac{r_1 + r_2}{r_1} = i'_0. \quad (4)$$

### Интервал времени $t_p$

Этот интервал времени, в котором работают тиристоры  $V_3$  и  $V_4$ , исчисляется с момента запираания вентилей  $V_1$  и  $V_2$ . Процесс запираания вентилей  $V_1$  и  $V_2$  осуществляется коммутирующими конденсаторами  $C$  путем разряда их по контурам  $C-V_1-V_3$  и  $C-V_4-V_2$ . Наличие диодов  $D_1, D_2, D_3$  и  $D_4$  предотвращает разряд конденсаторов  $C$  через секции  $W_s$ .

При определении закона изменения тока  $i_{пв}(t)$  в параллельной ветви обмотки  $W_{пв} = W + W_s$  в интервале времени  $t_p$  используем принцип наложения, рассматривая переходный процесс как результат двух процессов: стационарного процесса в исходной цепи, представляющей собой параллельную ветвь обмотки с закороченной секцией  $W_s$ , и дополнительно установившегося процесса в измененной цепи, представляющей собой параллельную ветвь обмотки с разомкнутой секцией  $W_s$ .

Тогда, считая, что к моменту времени  $t_p = 0$  ток  $i_w(t)$  принял установившееся значение, изменение тока в параллельной ветви обмотки  $i_{пв}(t)$  в интервале времени  $t_p$  можно определить из уравнения

$$i_{пв}(t) = i_0 - \frac{e_{\phi}}{z_1(t) + z_2(t)}, \quad (5)$$

здесь  $z_1(t)$  и  $z_2(t)$  — полные сопротивления в переходном режиме соответственно части параллельной ветви  $W$  обмотки и контура, связанного с секцией  $W_s$ ;

$e_{\phi} = i_0' \cdot z_2(t)$  — фиктивная э. д. с., равная изменению напряжения на концах секции  $W_s$  при переходе от интервала  $t_3$  к интервалу  $t_p$ .

Решение (5) дает следующий закон изменения тока  $i_{пв}(t)$ :

$$i_{пв}(t) = i_0' \cdot \frac{1}{1 + f(t)}, \quad (6)$$

где

$$f(t) = \left[ \frac{r_2}{r_1} \left( 1 - e^{-\frac{r_1}{L_1} \cdot t_p} \right) + \frac{L_2}{L_1} \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1} \cdot t_p} \right] \times \left[ 1 - e^{-\frac{r_2}{2 \cdot L_2} \cdot t_p} \cdot \cos \omega t_p \right].$$

Полученные уравнения (2), (3) и (6) описывают поведение тока в обмотке и коммутируемых секциях во всех интервалах времени периода коммутации.

Для удобства дальнейшего анализа, имея в виду, что практически обычно бывают заданы сопротивление и индуктивность всей обмотки и количество выводов обмотки, связанной с полупроводниковым коллектором, введем дополнительно параметры  $L_0$  — индуктивность параллельной ветви обмотки и  $n$  — число пар выводов или число выводов в параллельной ветви обмотки.

Принимая во внимание, что

$$R_0 = r_1 + r_2; \quad n = \frac{r_1 + r_2}{r_2} = 1 + \frac{r_1}{r_2}; \quad \tau_0 = \frac{L_0}{R_0},$$

выразим приведенные ранее параметры через общие:

$$r_1 = R_0 \cdot \frac{n-1}{n}; \quad L_1 = L_0 \cdot \left( \frac{n-1}{n} \right)^2; \quad \tau_1 = \frac{L_1}{r_1} = \tau_0 \cdot \frac{n-1}{n}$$

$$r_2 = R_0 \cdot \frac{1}{n}; \quad L_2 = L_0 \cdot \left( \frac{1}{n} \right)^2; \quad \tau_2 = \frac{L_2}{r_2} = \tau_0 \cdot \frac{1}{n}$$

Тогда уравнения (2), (3) и (6) можно написать следующим образом:

$$i_{w_s}(t) = i_0 \cdot e^{-n^2 \cdot \frac{t_3}{\tau_0}}, \quad (7)$$

$$i_w(t) = i_0 \left[ 1 + \frac{1}{n-1} \left( 1 - e^{-\frac{n}{n-1} \cdot \frac{t_3}{\tau_0}} \right) \right], \quad (8)$$

$$i_{nb}(t) = \frac{i_0 \cdot \frac{n}{n-1}}{1 + \left[ \frac{1}{n-1} \left( 1 - e^{-\frac{n}{n-1} \cdot \frac{t_p}{\tau_0}} \right) + \frac{1}{(n-1)^2} \cdot e^{-\frac{n}{n-1} \cdot \frac{t_p}{\tau_0}} \right]} \times \\ \times \frac{1}{\left[ 1 - e^{-\frac{n}{2} \cdot \frac{t_p}{\tau_0}} \cdot \cos \omega t_p \right]}. \quad (9)$$

Разность установившихся значений токов в интервалах времени  $t_3$  и  $t_p$  равна

$$\Delta i_0 = i_{w_{t_3=\infty}} - i_{nb_{t_p=\infty}} = i_0' - i_0 = i_0 \cdot \frac{1}{n-1},$$

откуда

$$i_0' = i_0 + \Delta i_0 = i_0 \frac{n}{n-1}.$$

При  $t_3 \neq \infty$  и  $t_p \neq \infty$  по обмотке будет протекать ток, величина которого в параллельной ветви будет равна:

$$i_{cp} = i_0 + \Delta i_{cp}. \quad (11)$$

В этом равенстве  $\Delta i_{cp}$  — среднее значение приращения тока при работе полупроводникового коллектора — является величиной постоянной и зависит от параметров обмотки, числа выводов  $n$  и длительности интервалов времени  $t_3$  и  $t_p$ .

Принимая во внимание, что

$$t_3 + t_p = T = \frac{1}{f},$$

где  $T$  — период коммутации,

$f$  — частота переключения полупроводникового коллектора, определение  $\Delta i_{cp} = f(n, f, \tau_0)$  произведем графоаналитическим методом.

Задав произвольными значениями  $L_0$ ,  $R_0$ ,  $n$  можно по (8) и (9) построить кривые изменения во времени токов  $i(t)$  и  $i_{nb}(t)$ . Анализ этих экспоненциальных кривых показывает почти полную их идентичность за исключением некоторого расхождения в начальных участках.

Это обстоятельство позволяет значительно упростить вывод формул для определения  $\Delta i_{cp}$ .

На рис. 2 графически изображен характер изменения тока в обмотке при различных частотах переключения коллектора:

$f_1 = 10$  герц и  $f_2 = 42$  герца, число выводов обмотки  $n = 10$  и произвольно взятом  $t_3 = 0,02$  сек. Величина  $t_3 = 0,02$  сек. определяется временем восстановления управляющих свойств тиристоров и зависит только от выбранного типа тиристоров.

Ось абсцисс на рис. 2 выбрана на уровне тока  $i_0$  при  $t_3 = 0$ , т. е. до начала переключения коллектора.

Из рис. 2 видно, что приращение тока в обмотке  $\Delta i_{cp}$  при любых соотношениях  $t_3$  и  $t_p$  достигает установившегося значения через некоторое время  $t_y$ .

Для определения зависимости  $\Delta i_{cp} = f(n, f, \tau_0)$  примем время  $t_y$  за начало координат и рассмотрим на рис. 3 кривую тока за один период частоты переключения полупроводникового коллектора.

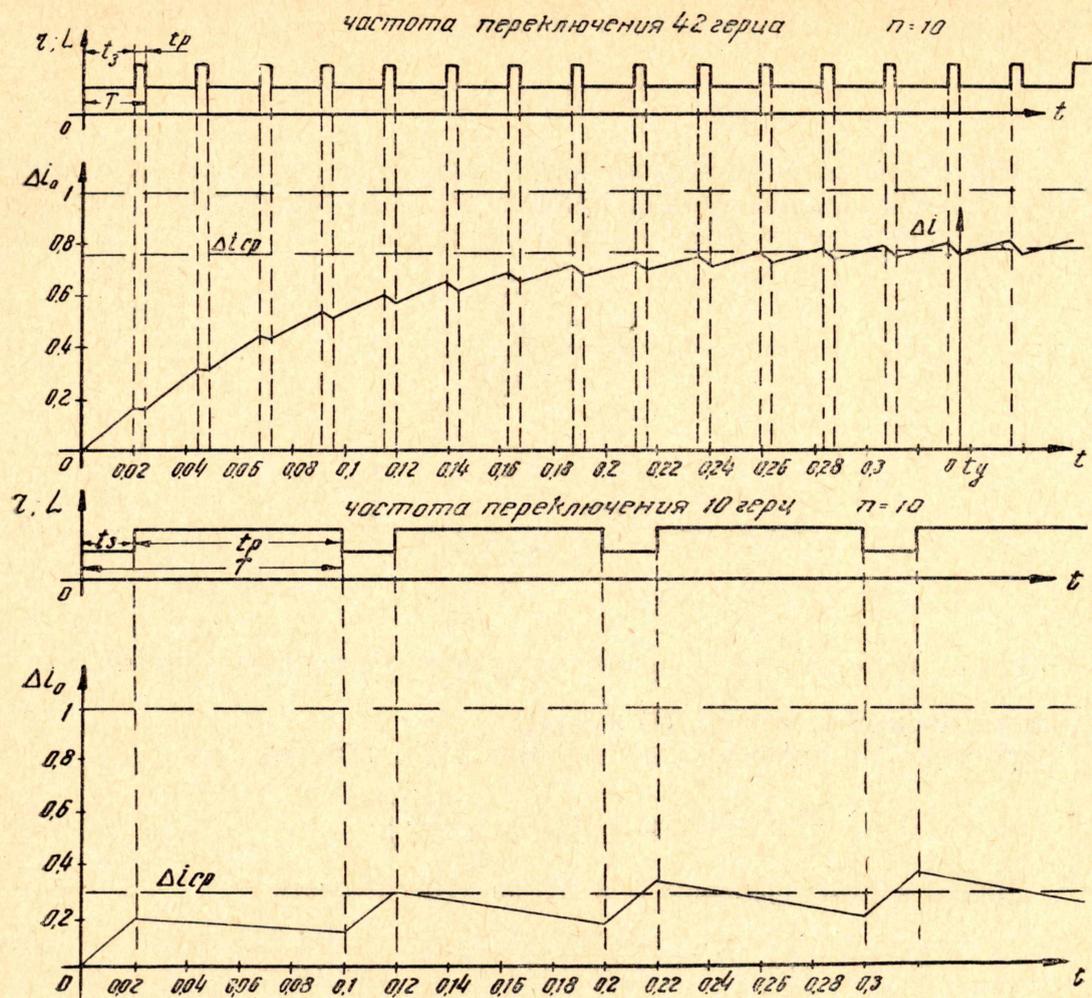


Рис. 2. Графическое определение среднего приращения тока в обмотке  $\Delta i_{cp}$  при переключении полупроводникового коллектора с частотами 10 герц 42 герца.

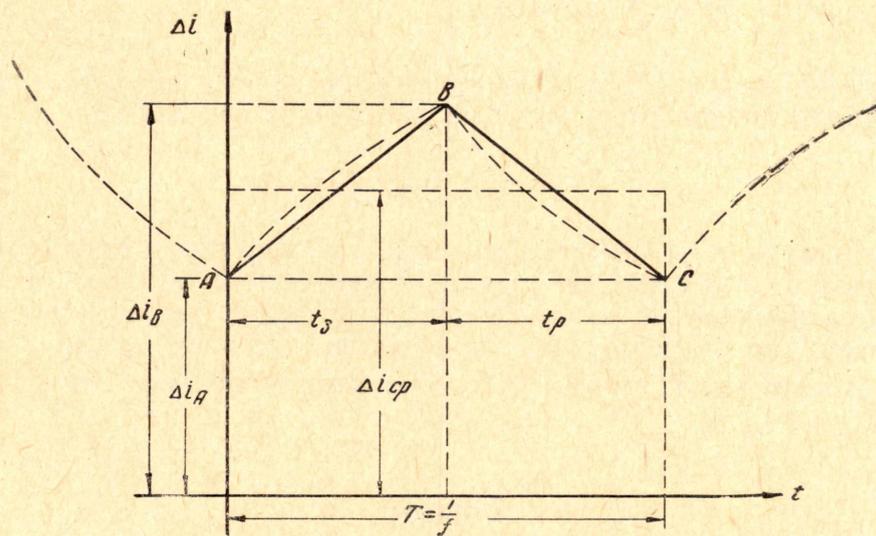


Рис. 3. Кривая изменения приращения тока  $\Delta i_0$  в обмотке за один период переключения полупроводникового коллектора.

Соединив точки А, В и С прямыми линиями, получим треугольник АВС. Среднее значение тока в обмотке  $\Delta i_{cp}$  будем считать равным

$$\Delta i_{cp} = \frac{1}{2} (\Delta i_A + \Delta i_B) \quad (12)$$

Принимая во внимание принятое выше допущение об идентичности экспоненциальных кривых токов  $i_w(t)$  и  $i_{пв}(t)$ , получим выражения для приращения токов в точках А и В:

$$\Delta i_B = \Delta i_0 \frac{1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{t_3 + t_p}{\tau_1}}}, \quad (13)$$

$$\Delta i_A = \Delta i_0 \frac{1 - e^{-\frac{t_3}{\tau_1}}}{1 - e^{-\frac{t_3 + t_p}{\tau_1}}} \cdot e^{-\frac{t_p}{\tau_1}}. \quad (14)$$

Здесь  $\tau_1 = \tau_0 \frac{n-1}{n}$  — принятая единая постоянная времени переходных процессов токов  $i_w(t)$  и  $i_{пв}(t)$ .

Подставляя  $\Delta i_A$  и  $\Delta i_B$  из (14) и (13) в (12), получим

$$\Delta i_{cp} = \Delta i_0 \cdot t_3 \cdot f \cdot \left( 1 - \frac{t_p}{2 \cdot \tau_1} \right). \quad (15)$$

Вводя в (15) значения  $\tau_1$  и  $\Delta i_0$  из (10) получим

$$i_0 \cdot \frac{1}{n-1} \left[ \left( 1 + \frac{t_3 \cdot n}{2 \cdot \tau_0 (n-1)} \right) \cdot t_3 \cdot f - \frac{t_3 \cdot n}{2 \cdot \tau_0 (n-1)} \right]. \quad (16)$$

Уравнение (16) справедливо для значений частот  $f$  переключения полупроводникового коллектора, лежащих в пределах

$$\frac{1}{2 \cdot \tau_0 \cdot \frac{n-1}{n} + t_3} < f < \frac{1}{t_3}. \quad (17)$$

Верхний предел обусловлен принципом работы предложенной схемы полупроводникового коллектора, а именно, при частоте

$$f > \frac{1}{t_3} \quad \frac{t_3}{T} < 1.$$

Такой режим работы нельзя допускать, так как при этом могут быть одновременно замкнуты две, три и более секций обмотки, и работа коллектора нарушается. Нижний предел значения частот в (17) обусловлен тем, что значение  $\Delta i_{cp}$  при малых частотах, когда значение  $\Delta i_B$  не зависит от  $T$ , может быть определено только интегральным методом.

### Выводы

В обмотке электрической машины, снабженной полупроводниковым коллектором и питаемой от источника постоянного тока, при любых частотах переключения коллектора протекает пульсирующий постоянный ток, среднее значение которого определяется частотой пере-

ключения ячеек полупроводникового коллектора, увеличиваясь с увеличением указанной частоты.

При этом минимальное значение постоянного тока в обмотке определяется подводимым к ней через полупроводниковый коллектор напряжением питания и омическим сопротивлением двух параллельных ветвей обмотки.

Величина максимального приращения среднего значения постоянного тока при максимальной для данной схемы частоте переключения коллектора равна отношению омического сопротивления коммутируемой секции к омическому сопротивлению параллельной ветви обмотки.

При достаточно большом числе выводов обмотки в расчетах электрических машин возможно допущение о независимости тока в обмотке от частоты переключения полупроводникового коллектора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Л. Каганов. Электронные и ионные преобразователи, ч. III. Госэнергоиздат, 1956.
2. Ш. И. Лутидзе. Электрические машины с управляемым полупроводниковым коммутатором. АН СССР, Электроэнергетика, вып. 5, 1962.