

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ КОЛЛЕКТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

Э. Ф. ОБЕРГАН, А. И. СКОРОСПЕШКИН

*Рекомендовано семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники*

В связи с развитием полупроводниковой техники получили развитие работы по созданию схем бесконтактной коммутации тока в электрических машинах.

В настоящей статье рассматривается разработанный нами полупроводниковый коллектор на тиристорах, позволяющих осуществлять вращение магнитного поля постоянного тока в электрических машинах.

На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема полупроводникового коллектора постоянного тока.

Обозначения на схеме:

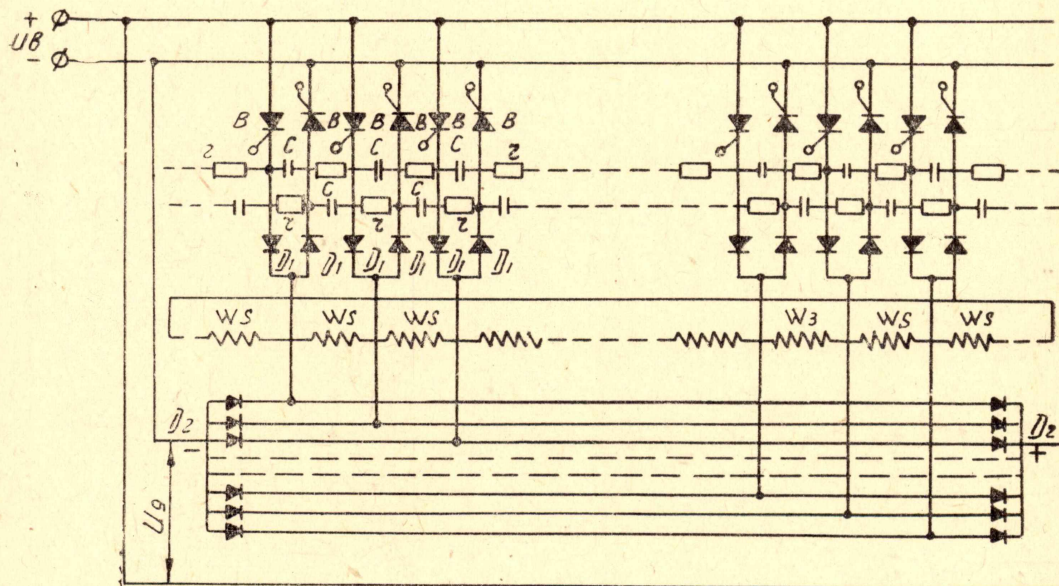


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема полупроводникового коллектора постоянного тока.

W_s — одна секция обмотки возбуждения;

B — управляемый клапан;

C — коммутационный конденсатор;

D_1 — отсекающий диод;

D_2 — выпрямительный диод;

U_B — напряжение возбуждения;

U_d — напряжение дополнительного источника постоянного

тока;

i_B — ток возбуждения в одной параллельной ветви обмотки;

I — ток возбуждения в общей цепи;

r — сопротивление контура RC .

Вращение оси магнитного потока возбуждения в пространстве при неподвижной обмотке возбуждения достигается последовательным перемещением точек подключения U_B к обмотке возбуждения. Это обеспечивается последовательным включением и отключением клапанов, соединенных с диаметрально расположенными выводами обмотки возбуждения и разнополярными шинами напряжения возбуждения.

Поскольку клапанный коллектор представляет собой симметричную кольцевую схему, подробный анализ рабочего процесса переключения U_B с одной пары выводов обмотки возбуждения на другую, смежную пару выводов, произведем по схеме рис. 2.

В момент времени $t_1 = 0$, включены клапаны B_1 и B_2 . Величина тока, протекающего по обмотке возбуждения, равна:

$$I_B = 2i_B = \frac{U}{R}, \quad (1)$$

где R — общее сопротивление обмотки возбуждения.

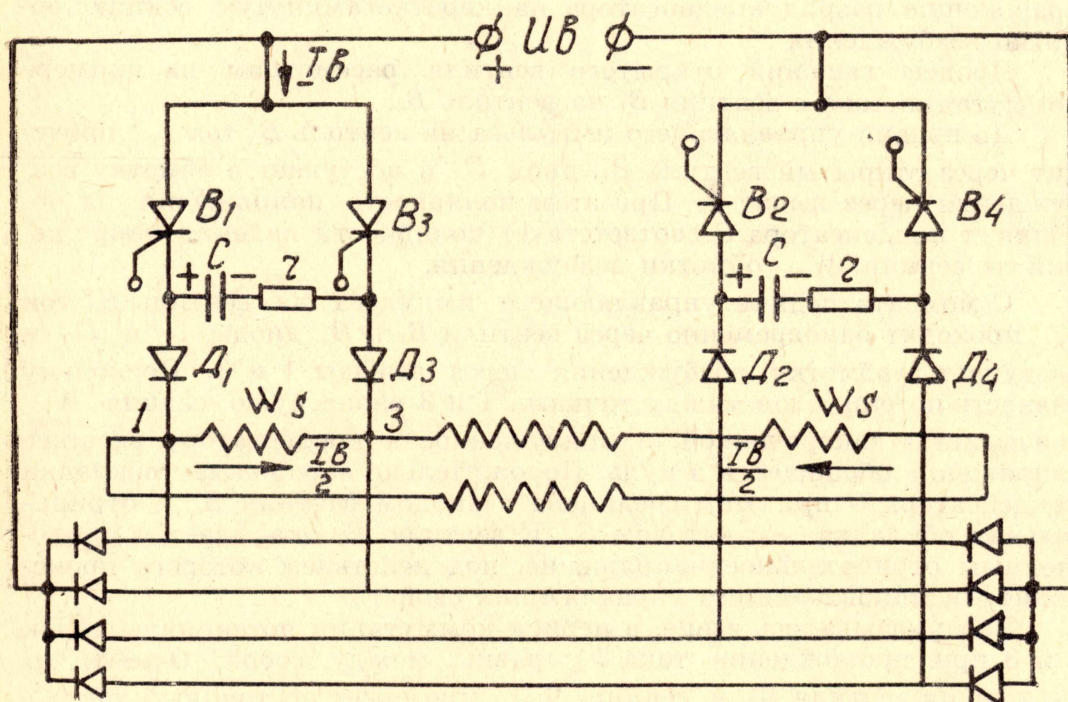


Рис. 2. Электрическая схема двух работающих ячеек коллектора в период коммутации.

В момент времени t_2 от управляющего устройства поступает управляющий импульс на вентили B_3 и B_4 , которые при этом открываются. Некоторое время ток I_B будет протекать через вентили B_1 , B_2 , B_3 и B_4 . После гашения вентилей B_1 и B_2 ток I_B будет протекать через вентили B_3 и B_4 , т. е. точки приложения U_B к обмотке возбуждения сместятся на угол

$$\alpha = \frac{2\pi}{n},$$

где n — число выводов обмотки возбуждения.

Широко распространенным способом гашения открытых вентилей является применение внутренних источников коммутирующих э. д. с., в качестве которых используются статические конденсаторы, работающие в режиме перезаряда. Подключение заряженных конденсаторов «С» непосредственно на открытые управляемые вентили приводит практически к мгновенной коммутации, поскольку разрядный контур $C-B_1-B_3$ почти полностью лишен индуктивности. Некоторой индуктивностью соединительных проводов и переходов анод—катод у вентилей можно пренебречь.

Вместе с тем, каждый тип управляемого вентиля обладает заданной конструкцией временем восстановления управляющих свойств. Поэтому критерием устойчивости коммутации служит неравенство

$$t_p > t_B, \quad (2)$$

где

t_p — время, в течение которого к вентилю прикладывается обратное напряжение, или время разряда конденсатора;

t_B — время восстановления управляющих свойств вентиля.

Для обеспечения этого неравенства в цепь конденсатора введено сопротивление r , а также включены отсекающие диоды D_1 , предотвращающие разряд конденсатора на короткозамкнутую секцию обмотки возбуждения.

Процесс гашения открытого вентиля рассмотрим на примере коммутации тока с вентиля B_1 на вентиль B_3 .

До подачи управляющего импульса на вентиль B_3 ток I_B проходит через открытый вентиль B_1 , диод D_1 и поступает в обмотку возбуждения через вывод 1. При этом полярность напряжения на обкладках конденсатора C соответствует полярности падения напряжения на секции W_S обмотки возбуждения.

С момента подачи управляющего импульса на вентиль B_3 ток I_B проходит одновременно через вентили B_1 и B_3 , диоды D_1 и D_3 и поступает в обмотку возбуждения через выводы 1 и 3. Поскольку разность потенциалов между точками 1 и 3 равна нулю, секция W_S оказывается закороченной, и приложенное к конденсатору внешнее напряжение обращается в нуль. Положительно заряженная обкладка конденсатора C при этом соединена с анодом вентиля B_1 , а отрицательная обкладка — с катодом B_1 . К вентилю B_1 оказывается приложенным отрицательное напряжение, под действием которого происходит восстановление его управляющих свойств.

Как указывалось выше, в период коммутации потенциалы точек 1 и 3 при прохождении тока I_B равны между собой. Однако до включения вентиля B_3 по секции W_S протекает постоянный ток i_B . Следовательно, в период коммутации секция W_S за счет энергии магнитного поля, запасенной в ней, будет генерировать реактивную мощность, при этом полярность напряжения в точках 1 и 3 будет

обратной полярности падения напряжения на секции W_s при протекании по ней тока i_B . Эта реактивная мощность отрицательна по отношению к мощности, развиваемой в обмотке возбуждения током I_B . Для исключения пульсаций тока I_B в обмотке возбуждения емкость конденсатора C следует выбирать такой величины, чтобы время перезаряда C было равно времени установления тока — i_B в секции W_s после запираания вентиля B_1 . Если при этом ограничивается верхний предел частоты переключения вентиля, то емкость C необходимо выбирать только из условия (2), а для компенсации реактивного сопротивления секций W_s во время коммутации, а также для компенсации реактивной мощности обмотки возбуждения, вызванной пульсацией тока возбуждения, целесообразно использовать рекомендации, которые дает теория вентильных инверторов.

Если все выводы обмотки возбуждения соединить с многофазным выпрямителем, то реактивная мощность коммутирующих секций и реактивная мощность обмотки возбуждения преобразуются в дополнительный источник постоянного тока, который можно подключить к основному источнику постоянного тока — источнику возбуждения. Таким образом, реактивная мощность обмотки возбуждения становится активной и возвращается в цепь источника питания схемы. Описанный режим работы изображен графически на рис. 3. В момент времени $(\pi - \varphi)$ энергия из цепи возбуждения передается в обмотку возбуждения, а в момент времени φ энергия, запасенная в реактивных элементах обмотки возбуждения, передается в дополнительную цепь постоянного тока U_d . Следовательно, работа схемы может происходить

при любом $\cos \varphi$ от 1 до 0, а при $\varphi > \frac{\pi}{2}$ обмотка возбуждения переходит в генераторный режим и передача энергии в этом случае происходит от источника U_d к источнику U_B .

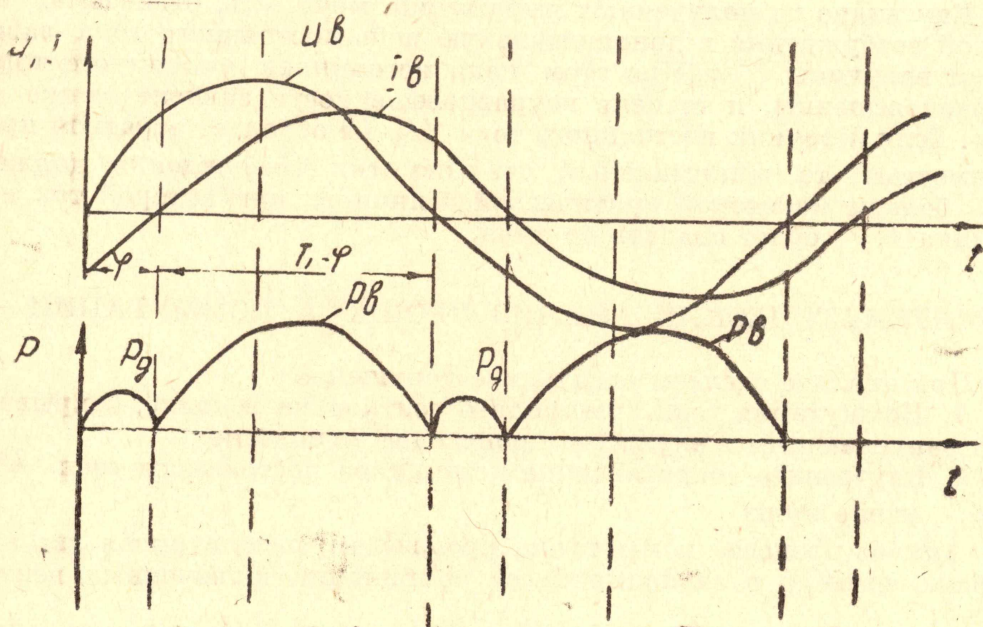


Рис. 3. Кривые энергетических соотношений в цепях постоянного тока U_B и U_d .

Если P_B — среднее значение мощности, потребляемой от источника U_B ,

P_D — среднее значение мощности, отдаваемой от обмотки возбуждения в цепь U_D ,

S — кажущаяся мощность нагрузки то, считая, что ток I_B и напряжение U_B в обмотке возбуждения изменяются во времени по синусоидальному закону (рассматривая первую гармоническую), можно записать [4]:

$$P'_B = \frac{P_B}{S}, \quad P'_D = \frac{P_D}{S}, \quad (3)$$

$$i_B = \sqrt{2} I_B \sin(\omega t - \varphi), \quad (4)$$

$$U_B = \sqrt{2} U_B \cdot \sin \omega t, \quad (5)$$

$$P_B = i_B U_B [\cos \varphi - \cos(\omega t - \varphi)],$$

$$P'_B = \frac{1}{IU} \cdot \frac{2}{T} \int_{-\frac{1}{2\pi}\varphi}^{\frac{1}{2}} P_B dt = \cos \varphi + \frac{1}{\pi} (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi), \quad (7)$$

$$P'_D = \frac{1}{I \cdot U} \cdot \left| \frac{2}{T} \int_0^{\frac{1}{2\pi}\varphi} P_B dt \right| = \frac{1}{\pi} (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi). \quad (8)$$

Как видно из полученных выражений, мощность, отдаваемая обмоткой возбуждения в дополнительную цепь постоянного тока, зависит от величины $\cos \varphi$. При этом цепи источников постоянного тока неуравновешенны, и степень неуравновешенности зависит также от $\cos \varphi$. Если источник постоянного тока U_B не обладает обратной проводимостью, то минимальный $\cos \varphi$ обмотки возбуждения должен быть больше некоторой критической величины, при которой ток источника U_B будет спадать до нуля.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КОММУТАЦИИ

При анализе сделаем следующие допущения:

1. Коммутация тока с открытого вентиля на вентиль, открываемый запускающим импульсом, происходит мгновенно.

2. Внутреннее сопротивление источников постоянного тока U_B и U_D равно нулю.

Анализ процесса коммутации произведем, рассматривая два интервала времени в зависимости от комбинации включенных вентилях:

а) интервал времени α , когда проводят ток вентили $B_1; D_1; B_3; D_3; B_2; D_2; B_4; D_4$;

б) интервал времени β , когда проводят ток вентили $B_3; D_3; B_4; D_4$.

а) Интервал времени α .

До подачи управляющего импульса на клапан B_3 , ток I_B в обмотке возбуждения равен

$$I_B = \frac{U_B}{R},$$

где R — омическое сопротивление обмотки возбуждения. Это равенство говорит о том, что в конце интервала α переходный процесс заканчивается установившимся значением тока I_B .

После подачи управляющего импульса на клапан B_3 в момент времени $t(0)$ ток I_B , протекавший по клапану B_1 , начинает протекать также по клапану B_3 . При этом, считая проводимости клапанов одинаковыми, ток I_B распределится между ними поровну.

Величина тока I_B при этом изменится вследствие изменения омического сопротивления обмотки возбуждения на величину

$$\frac{R - \Delta R}{R},$$

где $\Delta R = 2r_s$ — сопротивление двух короткозамкнутых секций W_s обмотки возбуждения, и будет равна

$$I_{B\alpha} = I_B + \Delta I_{B0} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}), \quad (9)$$

где

$$\Delta I_{B0} = U_B \cdot \frac{\Delta R}{R(R - \Delta R)}, \quad (10)$$

$\tau_1 = \frac{L - 2L_s}{R - 2r_s}$ — постоянная времени обмотки возбуждения с двумя короткозамкнутыми секциями.

$$\tau_1 = \frac{L/n}{R/n} = \frac{L}{R}. \quad (11)$$

Одновременно с этим процессом будет происходить процесс разряда конденсатора C по контуру $C-B_1-B_3-r$ и процесс спада тока в секции W_s до нуля. Пренебрегая сопротивлениями открытых клапанов B_1 и B_3 , можем записать значение напряжения на обкладках конденсатора в процессе разряда

$$U_C = U_s e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (12)$$

где

U_s — падение напряжения на сопротивлении секции W_s до подачи управляющего импульса на клапан B_3 ;

$\tau_2 = r \cdot C$ — постоянная времени контура. (13)

Ток в секции W_s будет уменьшаться по показательному закону. Поскольку в рассматриваемый интервал времени α клапан B_1 открыт, то секция W_s оказывается замкнутой накоротко через цепь дополнительного источника U_d . Значение тока при этом будет

$$i'_B = i_B e^{-\frac{t}{\tau_3}}, \quad (14)$$

где

$i_B = \frac{I_B}{2}$ — величина тока в параллельной ветви обмотки возбуждения до начала коммутации;

$\tau_3 = \frac{L_s}{r_s}$ — постоянная времени секции W_s обмотки возбуждения,

$$\tau_3 = \frac{L_s \cdot n}{r_s \cdot n} = \frac{L}{r} = \tau_1.$$

Для исключения влияния реактивной э. д. с. секции W_s , участвующей в процессе коммутации, на общую цепь обмотки возбуждения целесообразно, чтобы к концу интервала времени α ток в секции W_s упал до 0. Согласно приведенному закону изменения тока i'_B , он будет равен нулю через бесконечно большое время. Практически при значениях $\frac{i'_B}{i_B} = 0,01 \div 0,005$ можно считать процесс рассеивания реактивной энергии короткозамкнутой секции W_s законченным.

Следовательно, для соблюдения условия

$$i'_B(\alpha) = 0$$

необходимо, чтобы время рассеивания энергии секции W_s было не больше времени восстановления управляющих свойств вентиля B_1 , т. е. целесообразно соблюдение неравенства

$$\frac{t_B}{\tau_1} \geq 5. \quad (15)$$

Выполнение этого условия зависит от качества выбранных управляемых вентилях. В случае невозможности соблюдения этого неравенства, компенсацию влияния реактивной энергии коммутирующей секции осуществляет дополнительный источник U_d .

Если же указанное условие соблюдено, то расчет конденсатора C производится только из условия обеспечения надежной коммутации.

б) Интервал времени β .

Отсчет интервала времени β начинается с момента восстановления управляющих свойств вентиля B_1 и прекращения протекания по нему тока $\frac{I_B}{2}$. С этого момента весь ток I_B проходит через вентиль B_3 . Разветвляясь на две параллельные ветви обмотки возбуждения, ток $\frac{I_B}{2}$ будет проходить через секцию W_s , которую считаем обесточенной к началу интервала времени β и через цепь $r - C - D_1$.

Ток через секцию W_s будет равен

$$-i'_B = -\frac{I_B}{2} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}), \quad (16)$$

ток через цепь $r - C$

$$i'_C = \frac{I_B}{2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (17)$$

Общий ток в параллельной ветви не должен изменять своего значения и равен

$$\frac{I_B}{2} = i'_B + i'_C = \frac{I_B}{2} \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + \frac{I_B}{2}, \quad (18)$$

откуда

$$e^{-\frac{t}{\tau_2}} = e^{-\frac{t}{\tau_1}}, \quad (19)$$

$$\tau_2 = \tau_1. \quad (20)$$

Следовательно, из условия непрерывности тока I_B величину конденсатора необходимо брать равной

$$r \cdot C = \frac{L}{R},$$

$$C = \frac{L}{R \cdot r}. \quad (21)$$

Величина емкости конденсатора из условия надежной коммутации может быть определена, если зададимся

$$t_p = 2t_B, \quad (22)$$

тогда

$$\frac{U_C}{U_S} = e^{-\frac{t_p}{\tau_2}} = e^{-\frac{2t_B}{\tau_2}}.$$

Разряд можно считать законченным при

$$\frac{2t_B}{\tau_2} = 5, \quad (23)$$

откуда

$$\tau_2 = \frac{2t_B}{5} = r \cdot C,$$

$$C = \frac{2t_B}{5r}. \quad (24)$$

При необходимости обеспечения максимального для выбранного типа вентилях верхнего предела частоты переключения, емкость конденсатора C выбирается согласно равенству (24).

При необходимости обеспечения минимальных пульсаций тока I_B , емкость конденсатора C выбирается из условия (21).

ВЫВОДЫ

Разработанная схема полупроводникового коллектора позволяет осуществить электрическую машину постоянного или переменного тока, в которой ось магнитного поля возбуждения, созданного постоянным током, может вращаться в пространстве в широком диапазоне скоростей или же поворачиваться на определенный угол по заданному закону.

Количество выводов обмотки определяется заданным допустимым процентом искажения формы магнитного поля при вращении и максимальным значением частоты вращения поля (частоты переключения полупроводниковых ячеек).

При этом

$$f_n = \frac{f_{\text{упп}}}{n}.$$

f_{Π} — частота вращения поля;
 $f_{упр}$ — частота импульсов управления (переключения ячеек);
 n — число выводов обмотки.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Булгаков. Основы динамики управляемых вентильных схем. АН СССР, 1964.
2. Ф. И. Бутаев, Е. Л. Эттингер. Вентильный электропривод. ГЭИ, 1961.
3. А. С. Васильев, А. Е. Слухачкий. Электронные и ионные инверторы высокой частоты. ГЭИ, 1951.
4. Д. А. Завалишин, В. Ф. Шукалов. Вентильные преобразователи частоты для частотного регулирования скорости асинхронных двигателей. Вестник электропромышленности, № 6, 1961.
5. И. И. Кантер. Теория работы многофазных самоуправляемых инверторов с конденсаторной коммутацией. Электричество, № 3, 1951.
6. М. П. Костенко. Коллекторный генератор переменного тока с регулированием частоты независимо от скорости вращения. Электричество, № 2, 1948.