

ТИРИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ПРИВОДА ВРАЩАТЕЛЯ БУРОВОГО СТАНКА

И.М.СТОЛЯРОВ, В.О.ЧАШНИКОВ

Тиристорные регуляторы постоянного тока, или, как их называют, импульсные преобразователи постоянного тока, в системах управления, содержащих электрические машины, в ряде случаев оказываются более удобными, чем регулируемые тиристорные выпрямители. Применение управляемого выпрямителя часто затруднено из-за искажения формы кривой питающего напряжения. Если как-то не защитить систему управления от высших гармонических в кривой напряжения сети, то сбои в ее работе приведут к выходу из строя тиристорного выпрямителя. Аналогичные трудности возникают при использовании тиристорного выпрямителя в системах, где генератор питает нагрузку соизмеримой мощности (приводы в геологоразведочных экспедициях). Причем надо учитывать, что сам тиристорный преобразователь представляет собой генератор гармоник.

Особенно остро проблема создания тиристорного регулятора (ТР) постоянного тока возникает при работе с приводом вращателя станков шарошечного бурения, так как современные карьерные сети отличаются своей "мягкостью" и засоренностью высшими гармоническими составляющими. В этом случае применение тиристорных регуляторов постоянного тока с неуправляемым выпрямителем позволяет сделать систему более простой и надежной. Описание силовой части таких схем встречается нередко,^X но все эти схемы работают от гипотетических схем управления, которые либо не рассмотрены, либо чрезвычайно сложны.^{XX}

Схема управления предложенного регулятора постоянного тока (рис. I) отличается простотой. Регулятор питается от неуправляемого вентильного выпрямителя. Схема состоит из тиристора Т и коммутирующей цепи $L_k C_k$. Управляющий электрод тиристора Т через тиристор управления T_y и резистор R_y подключен к точке соединения $L_k C_k$. Управляющий электрод T_y через опорный диод D_y подключен к аноду T_y , благодаря этому система

^X Л.В. Бирэниекс. Импульсные преобразователи постоянного тока. М., "Энергия", 1974.

^{XX} М.Е. Гольц, А.Б. Гудзенко, В.М. Остреров, Л.А. Шпиглер. Автоматизированные электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями. М., "Энергия", 1972.

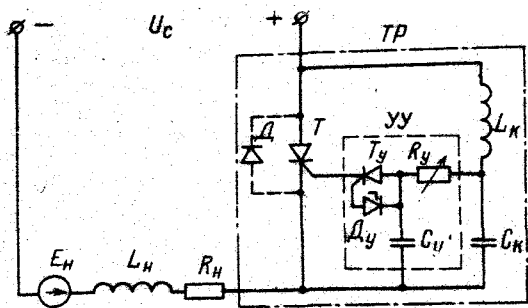


Рис. 1. Принципиальная схема тиристорного регулятора постоянного тока

$T_y - D_y$ четко выполняет функции переключателя (система $T_y - D_y$ имеет вольт-амперную характеристику динистора). Емкость C_y и резистор R_y позволяют задавать задержку отпирания тиристора. В самом общем случае нагрузка может быть представлена тремя элементами: L_H, R_H, E_H . Активно-индуктивную нагрузку можно рассматривать как частный случай $E_H = 0$, а учет E_H позволяет прогнозировать работу этой

схемы на двигательную нагрузку, и т.д. Таким образом, схема управляющего устройства УУ построена на четырех элементах: C_y, R_y, T_y, D_y . Число их может быть уменьшено до трех, если $T_y - D_y$ заменить динистором.

Схема работает следующим образом. При включении на напряжение сети постоянного тока тиристор T заперт и ток протекает по контуру $L_k - C_k$ - нагрузка. Емкость C_k заряжается и с запаздыванием по отношению к C_k будет заряжаться C_y . Когда напряжение на C_y достигнет уровня, достаточного для отпирания D_y , откроется тиристор управления T_y , емкость C_y , разряжаясь в управляющей цепи тиристора T , откроет его, и нагрузка окажется подключенной к источнику питания. Одновременно емкость C_k будет разряжаться в образовавшемся контуре $L_k - C_k$ через тиристор T . Процесс перезаряда емкости C_k носит колебательный характер. Запирание тиристора T произойдет в момент времени $t = t_k$ (где t_k - время импульса), когда ток контура i_k равен току нагрузки i_H , но с противоположным знаком ($i_H = -i_k$). Тиристор T закроется и под влиянием напряжения сети емкость C_k будет перезаряжаться по контуру $L_k - C_k$ - нагрузка до очередного момента отпирания тиристора T . Изменение среднего значения напряжения, прикладываемого к нагрузке, регулируется временем задержки отпирания тиристора T на интервале перезаряда емкости C_k по контуру нагрузки. Таким образом, режим работы схемы может быть охарактеризован продолжительностью импульса Δt_k , собственной частотой колебаний коммутационного контура и переменной продолжительностью паузы $\Delta t_H = \text{const}$.

Для надежной работы регулятора тока необходимо, чтобы отпирание тиристора T происходило в тот момент времени, когда в коммутационной емкости C_k накопился заряд, достаточный для запирания тиристора. Описываемая схема управления гарантирует это условие, так как отпирающий импульс формируется за счет напряжения на коммутационной емкости. Это особенно важно в том случае, если регулятор питается от однополупериодного выпрямителя.

Схема управления не нуждается ни в каких синхронизирующих импульсах или узлах синхронизации. Она может работать также без элементов T_y, D_y, C_y , но при этом существенно снижается диапазон регулирования тока нагрузки. Если же схема используется как коммутационный ключ в силовой цепи, т.е. в режиме включено - выключено, то для управления достаточно установить

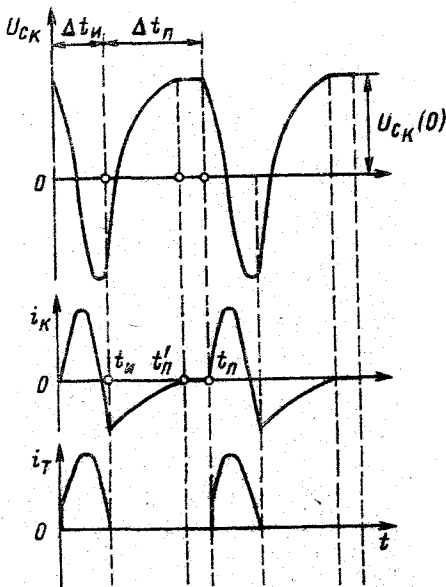


Рис.2. Кривые тока и напряжения при перезаряде конденсатора током нагрузки.

какой-либо ключ в цепь управления; тогда необходимость в элементах T_y, D_y, C_y, R_y отпадает.

Схема может работать с перезарядом емкости C_K на интервале $\Delta t_{п}$: 1) ток нагрузки (описание этого режима дано выше); 2) ток колебательного контура $L_K C_K$ (тиристор T должен быть зашунтирован диодом D , который показан пунктиром на рис.1. Определяющую роль во втором случае играет режим накачки емкости C_K).

Рассмотрим работу схемы в установленном режиме на интервале паузы в первом случае (рис.2). Можно выделить следующие характерные режимы работы схемы: 1) интервал импульса $\Delta t_{и}$ - тиристор открыт; 2) интервал паузы $\Delta t_{п}$ - тиристор закрыт.

Интервал импульса. Отпирание тиристора T происходит в тот момент, когда напряжение, снимаемое с задающего потенциометра, достигает значения $U_{п}$, достаточного для отпирания порогового элемента:

$$\frac{U_{п}}{R_y} > I_{y \text{ отп}},$$

где R_y - суммарное сопротивление цепи управляющего электрода тиристора; $I_{y \text{ отп}}$ - ток отпирания силового тиристора T по цепи управления.

Момент отпирания примем за начало отсчета. На интервале импульса напряжение сети прикладывается к нагрузке. Одновременно замыкается цепь коммутирующего контура $L_K C_K$, высокая добротность которого является обязательным условием нормального функционирования схемы. Поэтому активным сопротивлением контура можно пренебречь. Для режима работы схемы $i_K(0) = 0$ можно записать

$$i_K = \frac{U_{CK}(0)}{\rho} \sin \omega_K t; \quad (1)$$

$$U_K = U_{CK}(0) \cos \omega_K t,$$

где ω_K - собственная частота коммутирующего контура; ρ - волновое сопротивление.

Момент запирания тиристора

$$t_K = \frac{1}{\omega_K} \arcsin \frac{i_H}{i_{K \text{ max}}} + \frac{\pi}{\omega_K}, \quad (2)$$

где i_H - мгновенное значение тока нагрузки;

$$i_{K \max} = \frac{U_{C_K}(0)}{\rho}$$

Следует отметить, что на интервале импульса ток тиристора $i_T = i_H + i_K$.

Интервал паузы. Напряжение на коммутирующей емкости в момент запираания тиристора

$$U_{C_K}(t = t_H) = U_{C_K}(0) \cos \omega_K t_H.$$

В соответствии с уравнениями (I) полярность U_{C_K} направлена согласно с напряжением сети U_C . Далее процесс перезаряда происходит по контуру нагрузки и может быть описан уравнением

$$U_C + U_{C_K}(t = t_H) = (L_K + L_H) \frac{di_K}{dt} + \frac{1}{C_K} \int_{t=t_H}^t i_K dt + R_H i_K. \quad (3)$$

Поведение тока контура на этом интервале определяется видом корней характеристического уравнения, т.е. соотношением между активным сопротивлением нагрузки и суммарной индуктивностью цепи перезаряда. Для $R_H < 2\sqrt{\frac{L_K + L_H}{C_K}}$ корни комплексные и, как известно, для тока можно записать уравнение

$$i_K = - \frac{U_C + U_{C_K}(t = t_H)}{\omega' (L_H + L_K)} e^{-\delta t} \sin \omega' t, \quad (4)$$

где

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{(L_H + L_K) C_K} - \frac{R_H^2}{4(L_H + L_K)^2}}; \quad \delta = \frac{R_H}{2(L_H + L_K)}$$

В установившемся режиме время паузы может быть определено как время, в течение которого напряжение на емкости изменится от $U_{C_K}(t = t_H)$ до $U_{C_K}(0)$. Таким образом, продолжительность интервала паузы можно найти как время, в течение которого заряд коммутирующей емкости изменяется от $U_{C_K}(t = t_H)$ до $U_{C_K}(0)$ плюс выдержка, задаваемая схемой управления. Напряжение емкости на интервале паузы

$$U_{C_K} = \frac{1}{C_K} \int_{t=t_H}^t i_K dt + U_{C_K}(t = t_H), \quad (5)$$

$$t \in (t_H; t_H'),$$

где t_H' - момент времени, в который U_{C_K} достигает значения $U_{C_K}(0)$.

На основании уравнений (I), (4) и (5) построены графики изменения напряжения на коммутирующей емкости и тока колебательного контура (см. рис.2).

Таким образом, при выборе параметров силовой цепи схемы собственная частота колебаний коммутирующего контура должна быть не более рабочей

частоты тиристора, а амплитудное значение тока колебательного контура — не меньше наибольшего значения тока нагрузки, т.е.

$$\omega_T > \frac{1}{\sqrt{L_K C_K}} ;$$

$$i_{H \max} < U_{C_K}(0) \sqrt{\frac{C_K}{L_K}} .$$
(6)

Кривые тока контура i_K (см. рис.2) показывают: ток нагрузки протекает как через тиристор (интервал импульса), так и через коммутирующий контур (интервал паузы). Поэтому выбор тиристора нельзя производить по току нагрузки, а, учитывая особенности работы схемы, следует предварительно оценить соотношение между током тиристора и током нагрузки.

Действующее значение тока тиристора

$$I_T^2 = \frac{1}{\Delta t_H + \Delta t_H} \int_0^{t_H} (i_H + i_H)^2 dt .$$
(7)

Очевидно, что расчет тока тиристора надо вести на максимальное значение тока нагрузки, т.е. когда $t_H' = t_H$. Для этого режима работы с достаточной степенью точности можно считать, что

$$i_H = I_H = \text{const} ,$$
(8)

где I_H — действующее значение тока нагрузки.

Ток контура

$$i_K = i_{K \max} \sin \omega_K t .$$
(9)

Тогда

$$I_T^2 = \frac{\Delta t_H}{\Delta t_H + \Delta t_H} \left(i_H^2 + \frac{1}{2} i_{K \max}^2 \right) - \varepsilon i_{K \max}^2 ,$$
(10)

где

$$\varepsilon = \frac{1}{\omega_K (\Delta t_H + \Delta t_H)} \left[\frac{i}{4} \sin 2\omega_K t_H - 2 \frac{i_H}{i_{K \max}} (1 - \cos \omega_K t_H) \right] .$$

Учитывая соотношения (8)–(10), получим

$$\left(\frac{I_T}{I_H} \right)^2 = \frac{\Delta t_H}{\Delta t_H + \Delta t_H} \left(1 + \frac{1}{2 i_H^{*2}} \right) - \frac{\varepsilon}{i_H^{*2}} ;$$
(II)

где i_H^* — ток нагрузки в относительных единицах.

Коэффициент ε обратно пропорционален собственной частоте колебаний контура. Очевидно, существует такое значение ω_K , при котором отношением ε / i_H^{*2} можно пренебречь как величиной высшего порядка малости. Тогда уравнение (II) примет вид

$$\left(\frac{I_T}{I_H}\right)^2 = \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_{II} + \Delta t_{II}} \left(1 + \frac{1}{2 i_H^{*2}}\right) \quad (12)$$

Таким образом, соотношение между действующим током тиристора I_T и током нагрузки I_H определяется соотношением между ω_K и частотой следования импульсов $\omega_{сл}$ (где $\omega_{сл} = \frac{1}{\Delta t_{II} + \Delta t_{II}}$).

Если принять значение ω_K достаточно большим ($\Delta t_{II} \ll \Delta t_{II}$), то можно добиться, чтобы I_T/I_H было меньше единицы. Таким образом, действующее значение тока тиристора тем меньше действующего значения тока нагрузки, чем выше частота собственных колебаний коммутирующего контура. А для каждой конкретной схемы разгрузку тиристора (рис.3) точно рассчитать можно по уравнению (12).

Если нагрузка носит двигательный характер, то в уравнениях системы электропривода должна быть учтена э.д.с. двигателя и вместо напряжения сети необходимо рассматривать величину $U_C - E_{\partial\partial} = U_C - k\omega$. Качественное описание процесса остается без изменения, но система будет устойчива, если выполняется условие $\Delta\omega_{II} + \Delta\omega_{II} = 0$.

Работа системы целесообразна с собственной частотой колебаний коммутирующего контура около нескольких килогерц, поэтому продолжительность паузы на несколько порядков превышает продолжительность интервала импульса (рис.4). Следовательно, для оценки устойчивости работы привода следует определить изменение скорости только на интервале паузы.

Для интервала паузы можно записать следующую систему уравнений:

$$\left(pL + \frac{1}{pC_K} + R_H\right) i_H(p) + k\omega(p) = \frac{U_C}{p} + L i_H(0) - \frac{U_{CK}(0)}{p}; \quad (13)$$

$$k i_H(p) - pJ\omega(p) = \frac{M_C}{p} - J\omega(0),$$

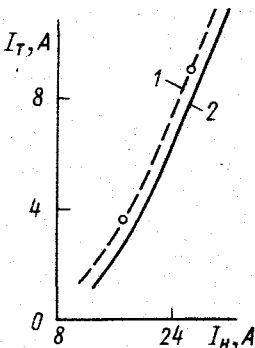


Рис.3. График разгрузки тиристора
1 и 2 - соответственно экспериментальная и теоретическая зависимости

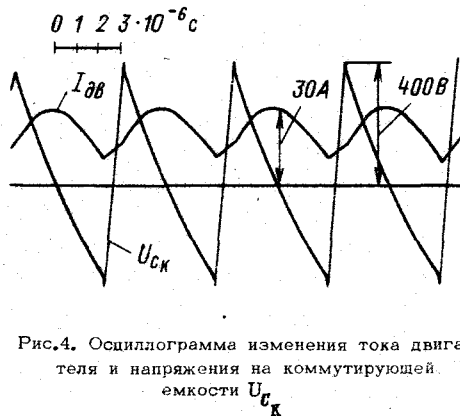


Рис.4. Осциллограмма изменения тока двигателя и напряжения на коммутирующей емкости U_{CK}

где

$$L = L_{\text{H}} + L_{\text{K}}; \quad k = k_{\text{M}} \Phi;$$

J - момент инерции привода; M_c - момент статических сопротивлений.
Тогда

$$\omega(p) = M_c \frac{Z(p)}{p\Delta} - \frac{k U_{\Delta}}{p\Delta} - J\omega(0) \frac{Z(p)}{\Delta} - \frac{k L i_{\text{H}}(0)}{\Delta}, \quad (14)$$

где

$$Z(p) = pL + \frac{1}{pC_{\text{K}}} + R_{\text{H}}, \quad \Delta = \begin{vmatrix} Z(p) & k \\ k & -pJ \end{vmatrix}$$

$$U_{\Delta} = U_c - U_{c_{\text{K}}}(0),$$

Переходя во временную область, получаем

$$\begin{aligned} \omega(t) = & -\frac{M_c}{J} \left[\frac{1}{\omega_0} \sin \omega_0 t + \frac{1}{LC_{\text{K}} \omega_0^2} \left(t - \frac{1}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right] + \frac{k U_{\Delta}}{LJ \omega_0^2} (1 - \cos \omega_0 t) + \\ & + \omega(0) \left[\cos \omega_0 t + \frac{1}{LC_{\text{K}} \omega_0^2} (1 - \cos \omega_0 t) \right] + \frac{k i_{\text{H}}(0)}{J \omega_0} \sin \omega_0 t, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC_{\text{K}}} + \frac{1}{LJ}$$

Обозначив в относительных единицах частоту собственных колебаний коммутирующего контура $\frac{1}{\omega_0} \sqrt{\frac{1}{LC_{\text{K}}}} = \xi$, получим

$$\begin{aligned} \omega(t) = & \omega(0) \left[\cos \omega_0 t + \xi^2 (1 - \cos \omega_0 t) \right] + \left[-\frac{M_c}{J \omega_0} + \frac{M_c}{J \omega_0} \xi^2 + \frac{k i_{\text{H}}(0)}{J \omega_0} \right] \sin \omega_0 t - \\ & - \frac{k U_{\Delta}}{LJ \omega_0^2} \cos \omega_0 t - \frac{M_c}{J} \xi^2 t + \frac{k U_{\Delta}}{LJ \omega_0^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

На основании проведенного анализа получен следующий критерий устойчивой работы привода:

$$1 - \xi^2 + \left(\xi^2 - 1 - \frac{k U_{\Delta}}{LJ \omega_0^2 \omega(0)} \right) \cos \omega_0 t_{\text{H}} - \frac{\alpha}{\omega(0)} \sin \omega_0 t_{\text{H}} - \frac{M_c}{J \omega(0)} \xi^2 t_{\text{H}} + \frac{k U_{\Delta}}{LJ \omega_0^2 \omega(0)} = 0. \quad (17)$$

Этот критерий позволяет оценить допустимые пределы регулирования продолжительности паузы, а следовательно, и диапазон регулирования при заданных параметрах привода.

Выводы

1. В рассмотренной схеме преобразователя постоянного тока, в отличие от ранее известных, система управления и силовая часть органически дополняют друг друга и составляют единое целое.

2. Важной особенностью схемы является то, что импульс на отпирание силового тиристора формируется коммутирующей емкостью; это исключает срыв коммутации силового тиристора.

3. Схема позволяет значительную часть мощности нагрузки пропускать не через тиристор, а через коммутирующий контур. Это позволяет в ряде случаев отказаться от параллельной работы тириستоров.

4. Простота схемы выражается в малом числе элементов схемы управления. Благодаря этому она достаточно перспективна в приводах горных машин и особенно буровых станков.