

ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИИ НА АВМ

В. А. БЕЙНАРОВИЧ, А. Е. ДЕЕВ, Л. С. УДУТ, В. С. ФАДЕЕВ

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ)

Устройства принудительной коммутации тиристоров (УПК) являются основными элементами, определяющими надежность работы, динамические свойства, энергетические показатели, вес и габариты силовых тиристорных реверсивных широтно-импульсных преобразователей. Из большого числа известных УПК лучшими возможностями, на наш взгляд, обладает УПК с независимым зарядом коммутирующего конденсатора и диодно-индуктивным сбрасывающим контуром, схема замещения которого представлена на рис. 1.

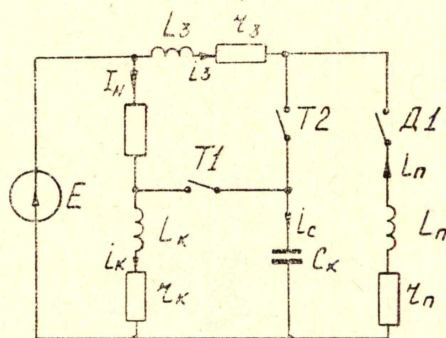


Рис. 1.

Такие УПК имеют целый ряд достоинств. Заряд и разряд коммутирующего конденсатора в этих УПК осуществляется по отдельным зарядно-разрядным контурам независимо от величины тока нагрузки вплоть до холостого хода преобразователя, когда ток нагрузки равен нулю. В таких УПК имеет место автоматическое увеличение коммутирующего напряжения U_c на коммутирующем конденсаторе C_k при возрастании тока нагрузки за счет вольтдобавки, вырабатываемой дросселем L_k , что позволяет существенно повышать кратковременные перегрузки преобразователя. Потери энергии в процессе коммутации уменьшаются, так как энергия конденсатора C_k , неиспользованная на коммутацию силового тока, возвращается в конденсатор благодаря колебательному процессу в цепи $C_k L_k$ и наличию перезарядной цепи $C_k L_n$, минуя источник питания, цепи питания и нагрузку.

В этом УПК от источника питания осуществляется только подзаряд коммутирующего конденсатора для покрытия потерь энергии в коммутирующем и перезарядном контурах. В рассматриваемом устройстве принудительной коммутации отсутствует возможность срыва

коммутации из-за возникновения сквозного тока через коммутирующий тиристор и зарядную цепь, поскольку в зарядной цепи УПК использован не диод, а тиристор с синхронизацией включения с запаздыванием относительно коммутирующего тиристора, а также применена блокирующая схема, которая запрещает прохождение запускающего импульса на включение коммутирующего тиристора до тех пор, пока коммутирующий конденсатор C_K не зарядится до заранее заданного напряжения. УПК, построенные по схеме рис. 1, позволяют с помощью импульсного трансформатора осуществить трансформацию коммутирующего напряжения одновременно в несколько потенциально развязанных коммутируемых тиристорных цепей. Еще одним достоинством таких УПК следует считать то, что их питание осуществляется от того же источника, что и для питания двигателя, т. е. не требуется отдельный источник питания. Это связано с тем, что в рассматриваемом УПК не используется явление «раскачки» от источника питания с целью повышения коммутирующего напряжения, при котором значительно увеличивается время подготовки УПК к работе.

Методика определения оптимальных параметров УПК может быть разработана на основе исследований влияния величины параметров УПК на электромагнитные процессы в схеме, коммутационные свойства, энергетические и динамические показатели УПК.

При работе УПК вследствие переключения вентилей изменяется электрическая схема и электромагнитные процессы удобно рассматривать по интервалам времени, на которых схема не изменяется, а начальные условия определяются конечными значениями величин на предыдущем интервале.

При первоначальном включении УПК происходит заряд коммутирующего конденсатора C_K от источника питания E через ключ T_2 (рис. 1). Дифференциальные уравнения процесса имеют вид

$$\left. \begin{aligned} E &= U_c + L_3 \frac{di_3}{dt} + i_3 r_3 \\ i_3 &= i_c = - C_K \frac{dU_c}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

После окончания заряда конденсатора C_K в момент коммутации замыкается ключ T_1 , конденсатор C_K разряжается через коммутирующий дроссель L_K и процесс будет описываться дифференциальными уравнениями

$$\left. \begin{aligned} U_c &= L_K \frac{di_K}{dt} + i_K \cdot r_K \\ i_K &= - C_K \frac{dU_c}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При повторном включении ключа T_2 происходит перезаряд конденсатора C_K с одновременным дозарядом его от источника питания. Дифференциальные уравнения процесса на этом интервале времени имеют вид

$$\left. \begin{aligned} E &= U_c + L_3 \frac{di_3}{dt} + i_3 \cdot r_3 \\ U_c &= L_n \frac{di_n}{dt} + i_n \cdot r_n \\ i_3 + i_n &= - C_K \frac{dU_c}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Процесс перезаряда заканчивается быстрее, чем процесс дозаряда от источника питания, и когда перезарядный ток уменьшится до нуля, процесс снова описывается дифференциальными уравнениями (1).

Поскольку аналитическое решение уравнений (1), (2), (3) и выбор по результатам решения параметров УПК на основе анализа влияния параметров на коммутационные свойства УПК представляет большие трудности, решение этих уравнений и анализ влияния параметров на коммутационные процессы производится с помощью АВМ.

При составлении электронной модели УПК были приняты допущения об идеальности вентилях — сопротивление вентиля в прямом направлении равно нулю, обратный ток вентиля не учитывается, коммутация вентилях осуществляется мгновенно. Такие допущения являются общепринятыми и облегчают моделирование, не внося значительной погрешности.

Для удобства моделирования представим дифференциальные уравнения (1) для зарядного контура в виде системы двух уравнений [1]

$$\left. \begin{aligned} E &= U_c + L_3 \frac{di_3}{dt} + i_3 \cdot r_3 \\ U_c &= \frac{1}{C} \int i_3 \cdot dt \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Вводя масштабные коэффициенты тока m_i , напряжения m_u и времени m_t , получаем из (4) машинные уравнения

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU_{M_{i_3}}}{dt_M} &= E_M \frac{m_{i_3}}{m_u \cdot m_t \cdot L_3} - U_{M_{i_3}} \frac{r_3}{m_t \cdot L_3} - U_{CM} \\ U_{CM} &= \frac{m_u}{m_{i_3} \cdot m_t \cdot C_K} \int U_{M_{i_3}} \cdot dt_M \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Структурная схема модели согласно уравнениям (5) представлена на рис. 2 тремя решающими усилителями 1, 2, 5. Параметры модели определяются из соотношений

$$\begin{aligned} R_{21} C_{11} = R_{31} C_{11} &= \frac{m_u \cdot m_t \cdot L_3}{m_{i_3}}; \quad R_{11} C_{11} = \frac{m_t L_3}{r_3}; \\ R_{22} C_{12} &= \frac{C_K \cdot m_{i_3} \cdot m_t}{m_u} \end{aligned} \quad (6)$$

Дифференциальные уравнения для набора модели коммутирующего и перезарядного контуров имеют вид

$$U_c = L_K \frac{di_K}{dt} + i_K \cdot r_K; \quad (7)$$

$$U_c = L_{\Pi} \frac{di_{\Pi}}{dt} + i_{\Pi} \cdot r_{\Pi}. \quad (8)$$

Вводя масштабные коэффициенты, получаем машинные уравнения

$$\frac{dU_{M_{i_K}}}{dt_M} = U_{CM} \frac{m_{i_K}}{m_u \cdot m_t \cdot L_K} - U_{M_{i_K}} \frac{r_K}{m_t \cdot L_K}; \quad (9)$$

$$\frac{dU_{M_{i_{\Pi}}}}{dt_M} = U_{CM} \frac{m_{i_{\Pi}}}{m_u \cdot m_t \cdot L_{\Pi}} - U_{M_{i_{\Pi}}} \frac{r_{\Pi}}{m_t \cdot L_{\Pi}}. \quad (10)$$

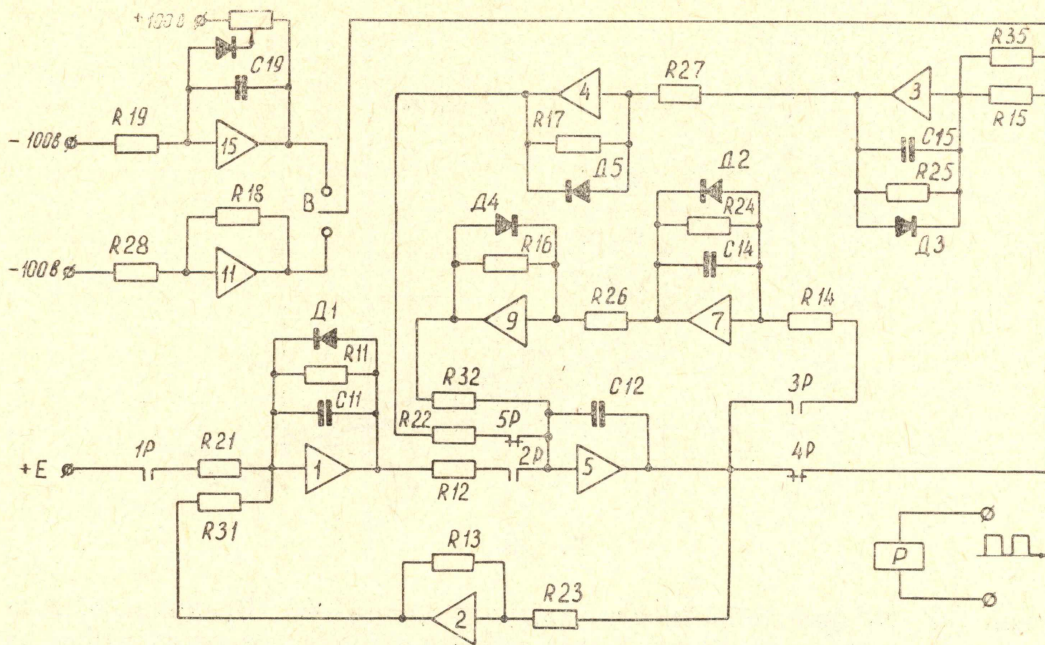


Рис. 2.

Структурная схема модели уравнения (9) представлена на рис. 2 интегрирующим усилителем 3 и инвертором 4. Параметры модели определяются из соотношений

$$R_{15} C_{15} = \frac{m_u \cdot m_t \cdot L_K}{m_{i_K}} ; R_{25} C_{15} = \frac{m_t \cdot L_K}{r_K} . \quad (11)$$

Структурная схема модели уравнения (10) на рис. 2 содержит интегрирующий усилитель 7 и инвертор 9, параметры модели определяются из соотношений

$$R_{14} C_{14} = \frac{m_u \cdot m_t \cdot L_{II}}{m_{i_{II}}} ; R_{24} \cdot C_{14} = \frac{m_t \cdot L_{II}}{r_{II}} . \quad (12)$$

Процесс включения коммутирующего тиристора Т1 имитируется нормально закрытыми контактами 4Р, 5Р, а включение зарядного тиристора Т2 — нормально открытыми контактами 1Р, 2Р, 3Р переключающего устройства Р. Диоды Д1-Д5 позволяют учитывать нелинейности реальной схемы, связанные с односторонней проводимостью вентилях. Для учета тока нагрузки в модели (рис. 2) служит усилитель 11, а для учета нарастающего во времени тока нагрузки — интегрирующий усилитель 15.

Электронная модель УПК дает возможность исследовать картину переходных процессов в самых различных режимах работы и оценить влияние параметров УПК на его коммутационные и динамические свойства.

В результате исследования влияния изменения параметров зарядной и перезарядной цепи были получены показанные на рис. 3 зависимости относительного амплитудного напряжения U_c на коммутирующем конденсаторе C_K от отношения $\frac{L_3}{L_{II}}$ при различных, но равных добротностях зарядного и перезарядного контуров Q и отсутствии тока нагрузки ($I_n=0$). Рассмотрев эти зависимости, можно сделать вывод о том, что для устранения «раскачки» коммутирующего напряжения выше $2E$ на холостом ходу необходимо выбирать отношение $\frac{L_3}{L_{II}}$,

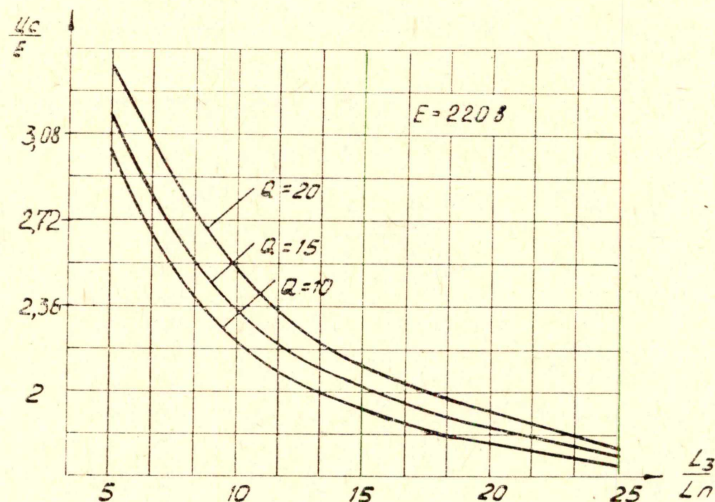


Рис. 3.

равное 15—20 при добротности контуров $Q=15—20$. Величина индуктивности зарядного дросселя должна выбираться из условия, чтобы за время, равное периоду коммутации, колебательный заряд коммутирующего конденсатора C_K от источника питания E полностью завершился.

Без учета потерь в коммутирующем контуре связь между параметрами L_K и C_K , обеспечивающая принудительную коммутацию силового тиристора, при постоянных значениях максимального напряжения на конденсаторе $U_{c\max}$, максимального тока нагрузки I_{\max} и времени восстановления запирающих свойств тиристора t_B с достаточной для практических расчетов точностью может быть записана в следующем виде [2]:

$$L_K = \frac{U_{c\max} \cdot t_B^2}{2C_K \left[U_{c\max} - E - \frac{I_{\max} \cdot t_B}{C_K} \right]} \quad (13)$$

На рис. 4 показана зависимость между параметрами L_K и C_K , построенная по уравнению (13) при определенных значениях других величин. Из рис. 4 видно, что параметры $L_K C_K$, обеспечивающие коммутацию, можно варьировать в широких пределах. Однако выбор параметров коммутирующего контура $L_K C_K$ требуется производить с учетом пе-

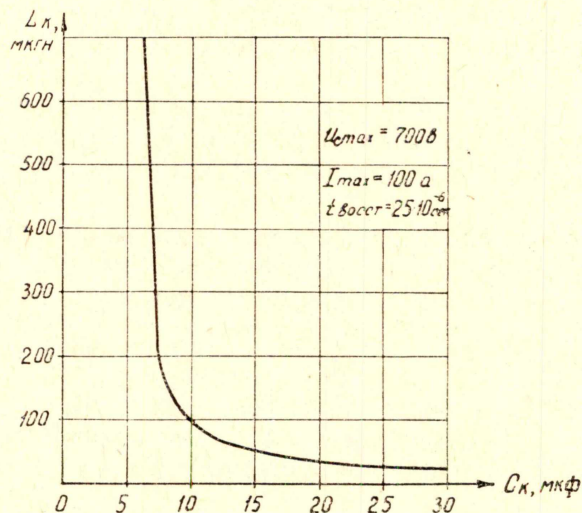


Рис. 4.

регрузочной способности преобразователя, то есть обеспечения необходимого автоматического возрастания коммутирующего напряжения при увеличении тока нагрузки. Для этого на АВМ были рассчитаны и исследованы зависимости отношения амплитуды напряжения U_c на коммутирующем конденсаторе C_k к напряжению источника питания E в функции относительного значения тока нагрузки при различных соотношениях $\frac{L_k}{C_k}$, определяемых выражением (13) рис. 4. Вид таких зависимостей показан на рис. 5 сплошными линиями. На этом же рис. 5 пунктирными линиями для тех же соотношений $\frac{L_k}{C_k}$ показаны зависимости величины коммутирующего напряжения, требующегося для

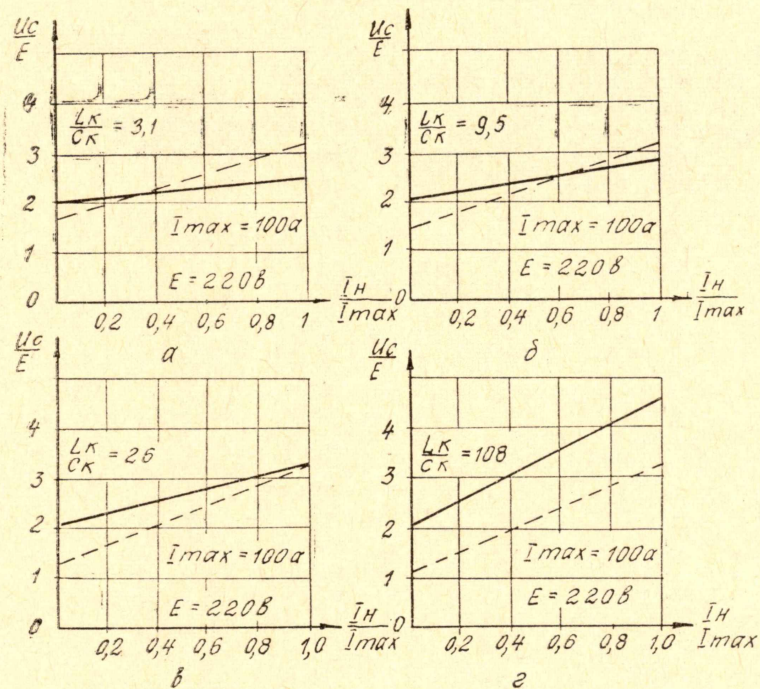


Рис. 5.

выключения разных значений тока нагрузки, рассчитанные по формуле (14), полученной из (13)

$$U_c = \frac{2L_k C_k \left(E + \frac{I_n \cdot t_B}{C_k} \right)}{2L_k C_k - t_B^2} \quad (14)$$

Из рис. 5 видно, что с увеличением отношения $\frac{L_k}{C_k}$ возрастает коммутирующее напряжение на конденсаторе C_k за счет вольтодобавки от тока нагрузки. При исследованиях было определено, что оптимальное соотношение $\frac{L_k}{C_k}$ равно 26. При меньших значениях отношения $\frac{L_k}{C_k}$ вольтодобавка от тока нагрузки мала и устройство принудительной коммутации не обеспечивает выключение заданного максимального тока нагрузки. При отношениях $\frac{L_k}{C_k}$ больше 26 наблюдается избыточное увеличение напряжения коммутации, что ведет к необходимости применения конденсаторов и тиристоров с повышенным рабочим напряжением и обуславливает рост коммутационных потерь.

Электронная модель устройства принудительной коммутации позволяет исследовать динамические свойства УПК. Для этого в модель вводится с помощью усилителя 15 нарастающий во времени ток нагрузки и определяется при этом скорость нарастания коммутирующего напряжения на конденсаторе C_k . Таким образом, можно определить допустимую скорость нарастания тока нагрузки, при которой не будет происходить срыва коммутации.

Моделирование УПК дает возможность оценить влияние параметров на коммутационные свойства УПК и определить допустимые скорости нарастания тока нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Стульников, Е. В. Колчев. Моделирование полупроводниковых преобразователей. Киев, «Техника», 1971.
 2. В. А. Бейнарович, Л. С. Удут, В. С. Фадеев, Н. Г. Волков. К расчету параметров узла принудительной коммутации. Доклады VII научно-технической конференции. Статические преобразователи в электроприводе и автоматике. Томск, изд-во ТГУ, 1971.
-