

§ 4.2. Инверторы тока

Однофазный параллельный инвертор тока. На рис. 4.1, а приведена принципиальная схема однофазного параллельного мостового инвертора тока. Тиристоры отпираются попарно (B_1 и B_2 , B_3 и B_4) с относительным фазовым сдвигом, равным 180° . Во входной цепи включен дроссель L_d , индуктивность которого достаточно велика (в пределе $L_d = \infty$), благодаря чему входной ток i_d идеально сглажен, а ток через тиристоры имеет прямоугольную форму (рис. 4.1, б). При отпирании тиристоров B_1 , B_2 ток i_d , равный в течение полупериода выходной частоты току $i_{\text{вых}}$, разветвляется по двум ветвям: ток i_n протекает через нагрузку, а ток i_c — через конденсатор C , заряжая его с полярностью, указанной на рисунке без скобок. Через полупериод выходной частоты отпираются тиристоры B_3 , B_4 и конденсатор C оказывается закороченным всеми тиристорами. При этом ток разряда конденсатора, протекая навстречу рабочему току тиристоров B_1 , B_2 , уменьшает его до нуля практически мгновенно, так как сопротивление в контуре разряда конденсатора через тиристоры мало, а индуктивности рассеяния обмоток трансформатора (если последний имеется) находятся вне этого контура. Быстрое нарастание тока в тиристорах, которые отпираются, может вывести их из строя вследствие превышения допустимой величины di_a/dt . Поэтому в анодные цепи тиристоров на практике вводят дроссели, ограничивающие допустимую для конкретного типа тиристоров величину di_a/dt .

После спадания анодного тока тиристоров B_1 , B_2 до нуля к ним прикладывается обратное напряжение, определяемое напряжением на коммутирующем конденсаторе C . При запираании тиристоров B_1 , B_2 конденсатор C перезаряжается от источника питания через тиристоры B_3 , B_4 , приобретая противоположную полярность (на рисунке указана в скобках). Отметим, что при отпирании очередной пары тиристоров одновременно с разрядом конденсатора по контуру открытых тиристоров происходит также его разряд на нагрузку. При этом часть энергии конденсатора переходит в энергию индуктивностей контура, а другая часть рассеивается в его активных сопротивлениях. При отпирании тиристоров B_1 , B_2 процесс повторяется.

В любой момент времени суммарный ток на выходе инвертора при принятом допущении ($L_d \rightarrow \infty$) равен $i_{\text{вых}} = i_H + i_C = I_d = \text{const}$, но его направление изменяется через каждый полупериод на противоположное (рис. 4.1, б). В течение

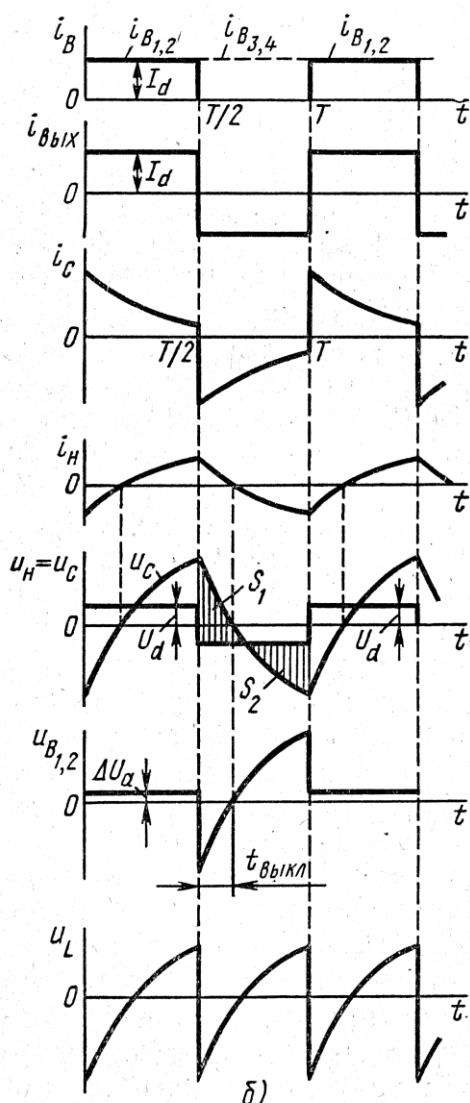
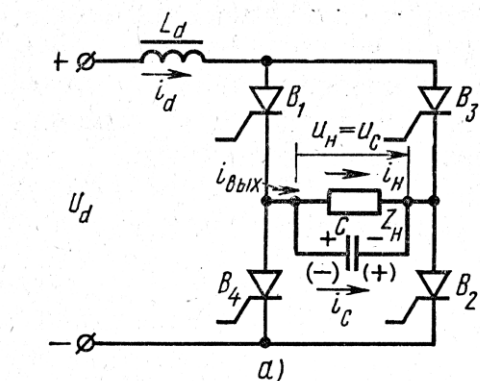


Рис. 4.1. Однофазный мостовой параллельный инвертор тока:
а — схема; б — временные диаграммы токов и напряжений

времени $t_{\text{выкл}}$ напряжение на конденсаторе ($u_C = u_H$) совпадает по направлению с прежним, ток нагрузки i_H сохраняет свое прежнее направление за счет разряда конденсатора на нагрузку, а ток коммутирующего конденсатора i_C с момента коммутации изменяет направление на противоположное.

Таким образом, ток конденсатора i_C после коммутации имеет максимальное значение и уменьшается по мере его перезаряда, а ток нагрузки i_H постепенно спадает до нуля и, реверсируя, совпадает по направлению с током i_C .

Дроссель L_d выполняет функцию фильтра высших гармонических составляющих напряжения, так как к нему в любой момент времени прикладывается разность между неизменным напряжением источника питания и пульсирующим напряжением на входе инвертора (называемым противо-э. д. с. инвертора).

Выходное напряжение инвертора повторяет по форме напряжение на конденсаторе и представляет собой в каждый полупериод сумму двух составляющих: постоянной, равной напряжению источника питания, и переменной, возникающей за счет реактивной мощности конденсатора. Поскольку за полупериод выходной частоты реактивная мощность равна нулю, заштрихованные площадки S_1 и S_2 (рис. 4.1, б), характеризующие интегральные значения переменной составляющей, равны между собой. Среднее значение выходного напряжения за полупериод равно напряжению источника питания U_d .

Напряжение на тиристорах B_1, B_2 ($u_{B1,2}$ на рис. 4.1, б) после коммутации изменяется от отрицатель-

ного значения к положительному. В течение времени $t_{\text{выкл}}$ на тиристорах B_1 и B_2 поддерживается отрицательное напряжение и они восстанавливают запирающие свойства.

Если $t_{\text{выкл}} > t_{\text{восст}}$, то с восстановлением положительного анодного напряжения тиристоры B_1 и B_2 (рис. 4.1, б) останутся запертыми вплоть до прихода следующего отпирающего импульса. Если же этого времени окажется недостаточно, то указанные тиристоры снова откроются и произойдет срыв инвертирования.

Коммутирующий конденсатор может быть включен параллельно первичной или вторичной обмотке трансформатора, если такой имеется.

В зависимости от соотношения величин индуктивности входного дросселя L_d , сопротивления нагрузки Z_H , частоты выходного напряжения f и емкости коммутирующего конденсатора C возможны три режима работы параллельного инвертора: 1) входной ток i_d непрерывен и идеально сглажен; 2) входной ток i_d непрерывен, но имеет пульсации; 3) входной ток i_d прерывистый.

При расчете инвертора воспользуемся эквивалентной схемой, справедливой в течение полупериода выходной частоты и полученной в предположении, что активное сопротивление дросселя и прямое падение напряжения на тиристорах равны нулю, а нагрузка чисто активная (рис. 4.2).

Так как индуктивность дросселя L_d бесконечно велика, ток i_d , потребляемый от источника питания, постоянен.

Для схемы рис. 4.2 можно записать следующую систему уравнений (если пренебречь начальными условиями):

$$\left. \begin{aligned} i_d &= I_d = i_H + i_C = \text{const}, \\ i_C &= C \frac{du_C}{dt}, \\ i_H &= u_H / r_H. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Решая эту систему относительно напряжения u_H в операторной форме, получаем:

$$U_H(p) = \frac{I_d}{pC \left(p + \frac{1}{Cr_H} \right)}.$$

Данная функция имеет два полюса: $p_1 = 0$ и $p_2 = -1/(Cr_H)$. Оригинал находим с помощью обратного преобразования Лапласа:

$$U_H(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} = \sum_{q=1}^{\infty} \frac{F_1(p_q)}{F_2'(p_q)} e^{p_q t} = A_1 + A_2 e^{-\frac{t}{Cr_H}} = u_H(t). \quad (4.2)$$

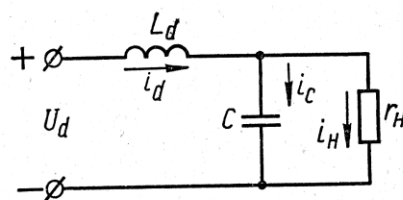


Рис. 4.2. Эквивалентная схема инвертора тока

шим ток, прикладывается отрицательное напряжение. Время записания можно определить из выражения (4.3), приравнявая его нулю:

$$u_n|_{t=t_{\text{выкл}}} = \frac{U_d \left(1 + e^{-\frac{T}{2T_n}} - 2e^{-\frac{t_{\text{выкл}}}{T_n}} \right)}{\left(1 + e^{-\frac{T}{2T_n}} \right) - \frac{4T_n}{T} \left(1 - e^{-\frac{T}{2T_n}} \right)} = 0. \quad (4.4)$$

Решая уравнение (4.4) относительно $t_{\text{выкл}}$, получаем:

$$t_{\text{выкл}} = T_n \ln \frac{2}{1 + e^{-\frac{T}{2T_n}}} \quad (4.5)$$

Из выражения (4.5) видно, что время записания увеличивается с увеличением сопротивления нагрузки и емкости коммутирующего конденсатора.

Рассматривая параллельное соединение коммутирующего конденсатора C и резистора Z_n как общую нагрузку, нетрудно видеть, что инвертор тока может работать лишь на общую емкостную нагрузку, когда выходной ток инвертора $i_{\text{вых}}$ опережает напряжение u_n на выходе инвертора. В этом случае к тиристорам, которые до коммутации проводили ток, прикладывается обратное напряжение. Время действия обратного напряжения на тиристорах должно быть достаточным для восстановления их запирающих свойств, т. е. $t_{\text{выкл}} \geq t_{\text{восст}}$ или $\beta \geq \delta$, где $\beta = \omega t_{\text{выкл}}$, $\delta = \omega t_{\text{восст}}$, ω — угловая выходная частота инвертора. Приведенное условие выполняется благодаря наличию угла опережения (записания) β тока $i_{\text{вых}}$, потребляемого нагрузкой и конденсатором, и напряжения u_n . Угол β создается за счет тока i_C коммутирующего конденсатора.

Анализ работы инвертора на активно-индуктивную нагрузку можно провести так же, как и для инвертора при чисто активной нагрузке. Однако зависимости для тока и напряжения получаются относительно сложными, а расчет — громоздким и трудным.

На практике, особенно при анализе многофазных инверторов, очень часто ограничиваются лишь учетом основной гармоники токов и напряжений. При этом характеристики, найденные методом основной гармоники, пригодны для инженерных расчетов, так как мало отличаются от характеристик, полученных путем решения дифференциальных уравнений (расхождение менее 10—15 %). Анализ инвертора методом основной гармоники проведем при следующих допущениях: напряжение на выходе инвертора синусоидально, инвертируемый ток идеально сглажен ($L_d = \infty$), активными потерями в элементах инвертора пренебрегаем, коммутация тока с тиристора на тиристор мгновенная.

Учитывая, что кривая инвертируемого тока имеет прямоугольную форму (рис. 4.4, а), действующее значение его первой гармоники определим из выражения

$$I = \frac{1}{\sqrt{2} \pi} \int_0^{2\pi} i_{\text{вых}} \sin \vartheta d\vartheta = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \int_0^{\pi} I_d \sin \vartheta d\vartheta = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d. \quad (4.6)$$

Пренебрегая потерями в инверторе и учитывая, что при принятых допущениях угол опережения $\beta = \psi_{(1)}$ равен углу сдвига фаз между инвертированным напряжением u_n и первой гармоникой инвертированного тока $i_{(1)}$ (рис. 4.4, а), получим, что активная мощность, потребляемая от источника питания, равна активной инвертированной мощности: $P_d = P_n$, т. е.

$$U_d I_d = U_n I \cos \beta = U_n I \cos \beta. \quad (4.7)$$

Из выражений (4.7) и (4.6) находим, что

$$U_n = \frac{U_d}{K_n \cos \beta}, \quad (4.8)$$

где $K_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9$ — коэффициент, зависящий от схемы инвертора.

Если нагрузка подключается через инверторный трансформатор, выражение (4.8) приобретает вид $U_n = \frac{n U_d}{K_n \cos \beta}$, где $n = \omega_2 / \omega_1$ — коэффициент трансформации инверторного трансформатора.

Угол опережения β зависит от соотношения реактивной и активной мощностей инвертора. Учитывая только первую гармонику, с помощью векторной диаграммы рис. 4.4, б найдем, что

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{Q_n}{P_n} = \frac{Q_c - Q_n}{P_n} = \frac{I_c - I_n \sin \varphi}{I_n \cos \varphi}, \quad (4.9)$$

где $Q_c = U_n I_c = (\omega C / n^2) U_n^2$ — реактивная мощность конденсатора; $Q_n = U_n I_n \sin \varphi$; $P_n = U_n I_n \cos \varphi$ — соответственно реактивная и актив-

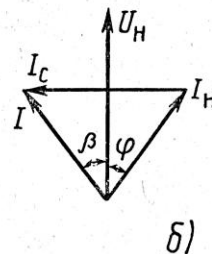
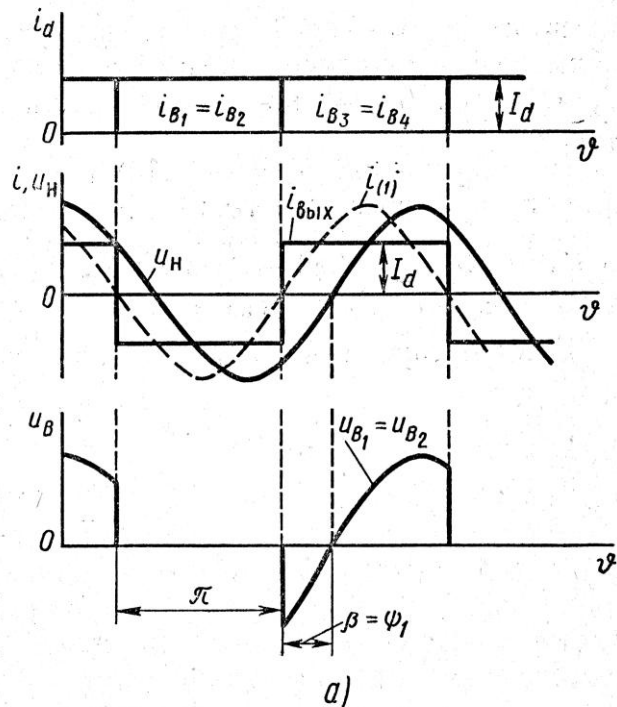


Рис. 4.4. Временные диаграммы токов и напряжений однофазного параллельного инвертора тока (а) и его векторная диаграмма (б)