

ГЛАВА 6. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Преобразователями постоянного тока называют устройства, преобразующие энергию постоянного тока одного напряжения в энергию постоянного тока другого напряжения.

По аналогии с обычными трансформаторами такие устройства иногда называют трансформаторами постоянного тока.

Принципиально эту задачу можно решить используя преобразователи уже рассмотренных классов (рис. 6.1).

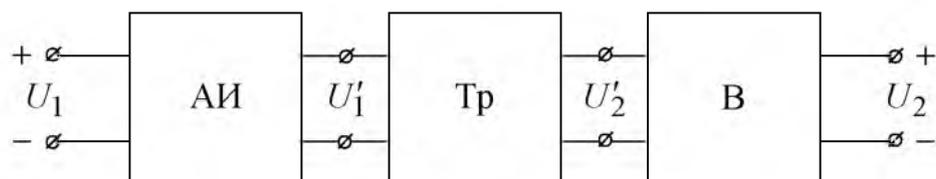


Рис. 6.1. Структурная схема преобразователя постоянного тока

Напряжение источника питания постоянного тока U_1 преобразуется автономным инвертором АИ в переменное напряжение U_1' , которое при помощи трансформатора Тр изменяется до величины U_2' , а затем при помощи выпрямителя В преобразуется в постоянное напряжение U_2 . Здесь выходное напряжение U_2 может быть как больше, так и меньше напряжения источника питания U_1 . Этот способ предполагает двойное преобразование энергии, что приводит к дополнительным потерям и снижению КПД. Свойства таких преобразователей определяются свойствами используемых здесь автономных инверторов и схем выпрямления, рассмотренных выше, и поэтому в данной главе не рассматриваются. Больше внимание уделим схемам непосредственного преобразования энергии постоянного тока – импульсным преобразователям постоянного тока (ИППТ). По принципу действия они подразделяются на параметрические, непрерывного действия и импульсные. Преобразователи параметрические и непрерывного действия в силу ряда своих особенностей применяются только в системах малой мощности и в рамках данного курса не рассматриваются. В системах средней и большой мощности применяются импульсные преобразователи, которые подразделяются на нереверсивные и реверсивные.

Нереверсивные импульсные преобразователи преобразуют напряжение источника питания в однополярное импульсное, обеспечивая тем самым широтно-импульсное регулирование выходного напряжения.

В соответствии со своим принципом действия неперевисные преобразователи чаще применяются в автономных системах электропитания.

Реверсивные преобразователи преобразуют напряжение источника питания в импульсное постоянной амплитуды, но различной полярности и длительности импульсов. Такого рода преобразователи находят широкое применение в реверсивных электроприводах постоянного тока.

6.1. НЕРЕВЕРСИВНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Одной из часто встречающихся схем неперевисных преобразователей постоянного тока является схема с последовательным ключевым элементом (рис. 6.2). Свое название она получила из-за последовательного соединения ключа К с цепью нагрузки.

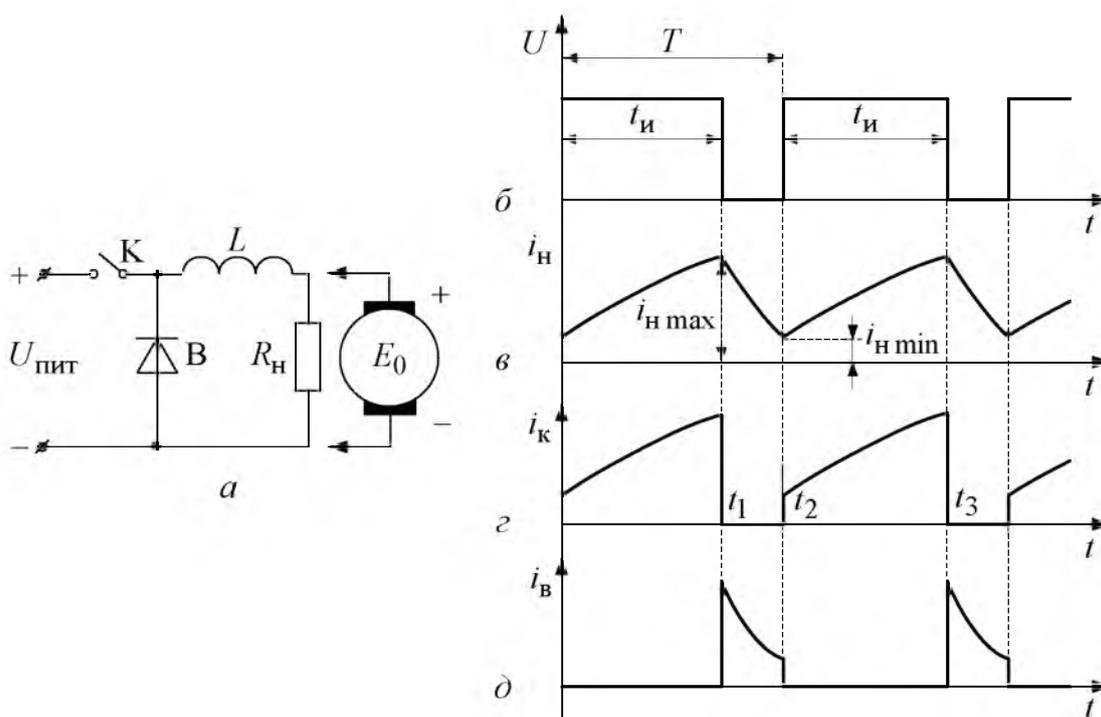


Рис. 6.2. Неперевисный ИППТ понижающего типа

Замыкая ключ в течение $t_{и}$ и размыкая его в течение $t_{п}$ с частотой $f = \frac{1}{T}$, получаем на нагрузке среднее значение напряжения:

$$U_{н} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{и}} U_{пит} dt = \frac{U_{пит} t_{и}}{T} = U_{пит} \gamma. \quad (6.1)$$

Отношение $\frac{t_{\text{и}}}{T} = \gamma$ называется коэффициентом заполнения импульсов.

Вентиль В служит для замыкания тока нагрузки в течение паузы $t_{\text{п}}$ под действием ЭДС самоиндукции $e_L = -L \frac{di_{\text{н}}}{dt}$.

Из (6.1) следует, что изменение γ позволяет регулировать напряжение на нагрузке в пределах, не превышающих напряжение источника питания. Регулирование может осуществляться как за счет изменения $t_{\text{и}}$ при неизменном T или изменением T при постоянном $t_{\text{и}}$, так и при одновременном изменении $t_{\text{и}}$ и T . Первый способ $t_{\text{и}} = \text{var}$, $T = \text{const}$ называется широтно-импульсным, второй – $T = \text{var}$, $t_{\text{и}} = \text{const}$ – частотно-импульсным, третий – $t_{\text{и}} = \text{var}$, $T = \text{var}$ – время-импульсным.

Составляя уравнение для схемы рис. 6.2 на интервале от 0 до t_1 при условии идеальности ключа К и вентиля В, получаем:

$$L \frac{di_{\text{н1}}}{dt} + i_{\text{н1}} R_{\text{н}} = U_{\text{пит}} \quad (6.2)$$

и на интервале от t_1 до t :

$$L \frac{di_{\text{н2}}}{dt} + i_{\text{н2}} R_{\text{н}} = 0. \quad (6.3)$$

Решение этих уравнений относительно тока $i_{\text{н}}$ с учетом того, что $i_{\text{н1}} \Big|_{t=0} = i_{\text{н2}} \Big|_{t=T}$ дает:

$$i_{\text{н1}} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{н}}} \left(1 - \frac{1 - e^{-\frac{TR_{\text{н}}}{L_{\text{н}}}} e^{-\frac{\gamma TR_{\text{н}}}{L_{\text{н}}}}}{1 - e^{-\frac{TR_{\text{н}}}{L_{\text{н}}}}} e^{-\frac{R_{\text{н}} t}{L_{\text{н}}}} \right), \quad (6.4)$$

$$i_{\text{н2}} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{н}}} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{н}}}{L_{\text{н}}}} \right) e^{-\frac{R_{\text{н}} t}{L_{\text{н}}}}}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{н}}}{L_{\text{н}}}} \right)}, \quad (6.5)$$

$$i_{\text{н max}} = i_{\text{н1}} \Big|_{t=t_{\text{и}}} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{н}}} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{н}}}{L_{\text{н}}}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{н}}}{L_{\text{н}}}} \right)}, \quad (6.6)$$

$$i_{\text{H min}} = i_{\text{H2}} \Big|_{t=T} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{H}}} \frac{\left(-1 + e^{-\frac{\gamma TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right)} e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}}. \quad (6.7)$$

Амплитуда пульсаций тока нагрузки

$$\Delta i_{\text{H}} = i_{\text{H max}} - i_{\text{H min}} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{H}}} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right)} \left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} e^{-\frac{\gamma TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right). \quad (6.8)$$

Среднее значение тока ключа К

$$I_{\text{K}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{H}}} i_{\text{H1}} dt = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{H}}} \left(\gamma - \frac{L_{\text{H}} \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right) \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right)}{R_{\text{H}} T \left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right)} \right). \quad (6.9)$$

Среднее значение тока вентиля В

$$I_{\text{B}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{H}}} i_{\text{H2}} dt = \frac{U_{\text{пит}} L_{\text{H}}}{R_{\text{H}}^2 T} \left(\frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right) \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right)} \right). \quad (6.10)$$

Среднее значение тока нагрузки

$$I_{\text{H}} = I_{\text{K}} + I_{\text{B}} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{H}}} \gamma. \quad (6.11)$$

Коэффициент пульсаций выходного напряжения

$$K_{\text{П}} = \frac{\Delta i_{\text{H}} R_{\text{H}}}{U_{\text{пит}}} = \frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right) \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} \right)}. \quad (6.12)$$

В случае нагрузки преобразователя на двигатель постоянного тока (рис. 6.2) уравнения (6.2; 6.3) принимают вид:

$$i_{\text{я1}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я1}}}{dt} = U_{\text{пит}} - E_0, \quad 0 < t < t_1, \quad (6.13)$$

$$i_{\text{я2}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я2}}}{dt} = E_0, \quad t_1 < t < t_2, \quad (6.14)$$

где $i_{\text{я}}$ – ток якоря двигателя; $R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной обмотки; $L_{\text{я}}$ – индуктивность обмотки якоря; E_0 – противоЭДС двигателя.

Как видно из рис. 6.3, в этом случае могут иметь место три режима:

- непрерывного тока (рис. 6.3, б, в, з);
- гранично-непрерывный режим (рис. 6.3, д, е, ж);
- режим прерывистых токов (рис. 6.3, з, и, к).

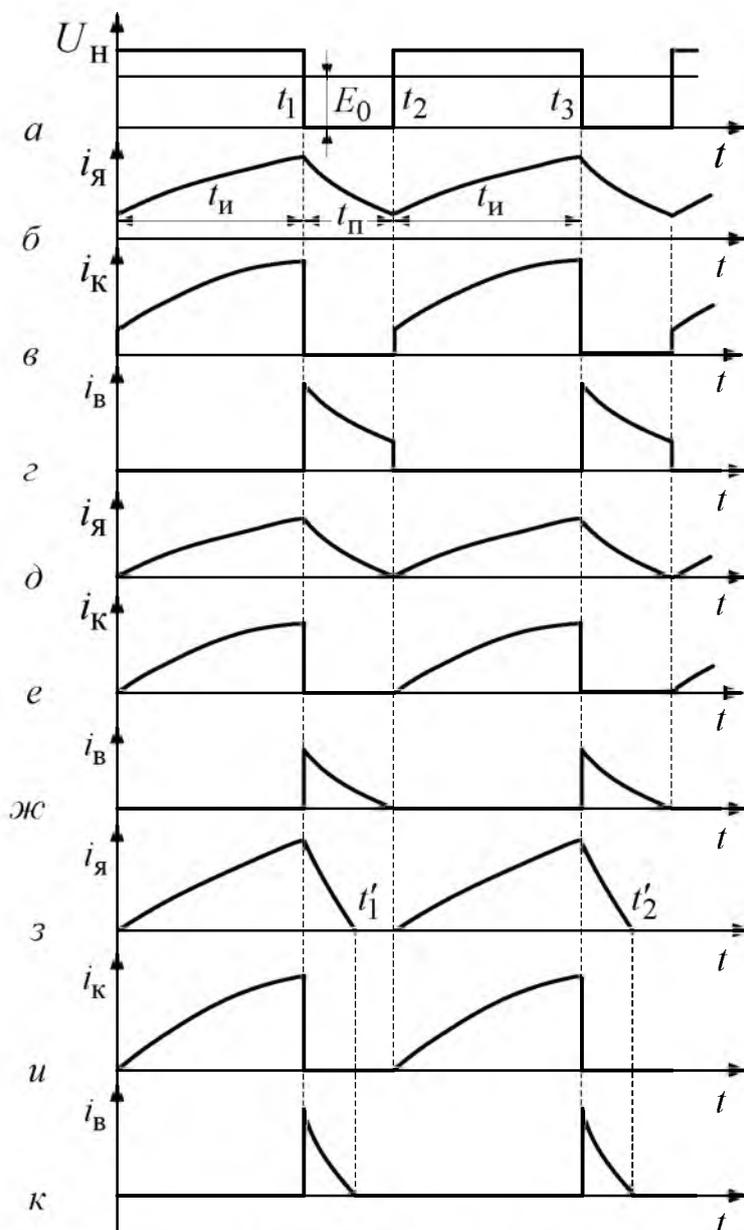


Рис. 6.3. Различные режимы работы нереверсивного ИППТ при работе на двигательную нагрузку

Для режима непрерывного тока из уравнений (6.13, 6.14)

находим $i_{я}$ при условии: $i_{я1} \Big|_{t=0} = i_{я2} \Big|_{t=T}$:

$$i_{я1} = \frac{U_{пит} - E_0}{R_я} - \frac{U_{пит}}{R_я} \frac{\left(1 - e^{-\frac{TR_я}{L_я}} e^{-\frac{\gamma TR_я}{L_я}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_я}{L_я}}\right)} e^{-\frac{R_я t}{L_я}}. \quad (6.15)$$

$$i_{я2} = -\frac{E_0}{R_я} + \frac{U_{пит}}{R_я} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_я}{L_я}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_я}{L_я}}\right)} e^{-\frac{R_я t}{L_я}}. \quad (6.16)$$

Максимальное и минимальное значение тока якоря

$$i_{я \max} = -\frac{E_0}{R_я} + \frac{U_{пит}}{R_я} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_я}{L_я}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_я}{L_я}}\right)}, \quad (6.17)$$

$$i_{я \min} = -\frac{E_0}{R_я} + \frac{U_{пит}}{R_я} \frac{\left(e^{-\frac{\gamma TR_я}{L_я}} - 1\right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_я}{L_я}}\right)} e^{-\frac{TR_я}{L_я}}. \quad (6.18)$$

Амплитуда пульсаций тока якоря

$$\Delta i_я = i_{я \max} - i_{я \min} = \frac{U_{пит}}{R_я} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_я}{L_я}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_я}{L_я}}\right)} \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_я}{L_я}} e^{-\frac{TR_я}{L_я}}\right). \quad (6.19)$$

Среднее значение тока якоря

$$I_я = \frac{U_{пит} \gamma - E_0}{R_я}. \quad (6.20)$$

В режиме прерывистых токов и в гранично-непрерывном режиме

$i_я \Big|_{t=0} = 0$ и при этом условии

$$i_{я1} = \frac{U_{пит} - E_0}{R_я} \left(1 - e^{-\frac{R_я t}{L_я}}\right), \quad (6.21)$$

$$i_{я2} = \frac{U_{пит} - E_0}{R_я} \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_я}{L_я}}\right) e^{-\frac{R_я t}{L_я}} - \frac{E_0}{R_я} \left(1 - e^{-\frac{R_я t}{L_я}}\right). \quad (6.22)$$

Максимальное значение тока якоря

$$i_{я \max} = \frac{U_{\text{пит}} - E_0}{R_{я}} \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{я}}{L_{я}}} \right). \quad (6.23)$$

Среднее значение тока якоря

$$I_{я} = \frac{U_{\text{пит}} \gamma}{R_{я}} - \frac{E_0 t_1}{R_{я}}. \quad (6.24)$$

Условия гранично-непрерывного режима находятся из

$$i_{я1} \Big|_{t=0} = 0:$$

$$E_{0\text{гр}} = U_{\text{пит}} e^{-\frac{TR_{я}}{L_{я}}} \frac{e^{\frac{\gamma TR_{я}}{L_{я}}} - 1}{1 - e^{-\frac{TR_{я}}{L_{я}}}}, \quad (6.25)$$

$$I_{\text{гр}} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{я}} \left(\gamma - e^{-\frac{TR_{я}}{L_{я}}} \frac{e^{\frac{\gamma TR_{я}}{L_{я}}} - 1}{1 - e^{-\frac{TR_{я}}{L_{я}}}} \right). \quad (6.26)$$

При работе преобразователя на двигательную нагрузку может возникнуть необходимость в двухстороннем обмене энергией между источником питания и двигателем (например, при рекуперативном торможении). В этом случае рассматриваемая схема дополняется ключом K_2 и вентилям B_1 (рис. 6.4, а). Ключи K_1 и K_2 в этой схеме открываются в противофазе, а протекание токов на отдельных интервалах поясняется диаграммами рис. 6.4, б.

На участке $t_1 \dots t_2$ энергия из источника питания поступает в двигатель; на участке $t_2 \dots t_3$ энергия, запасенная в магнитном поле индуктивности якоря, обеспечивает ток через вентиль B_2 , преодолевая противоЭДС E_0 за счет ЭДС самоиндукции обмотки якоря. На интервале $t_3 \dots t_4$ ток протекает через ключ K_2 за счет E_0 , а на участке $t_4 \dots t_5$ за счет ЭДС самоиндукции обмотки якоря часть энергии сбрасывается в источник питания.

Как было отмечено выше, характерной особенностью преобразователя с последовательным ключевым элементом является невозможность получения выходного напряжения больше напряжения источника питания.

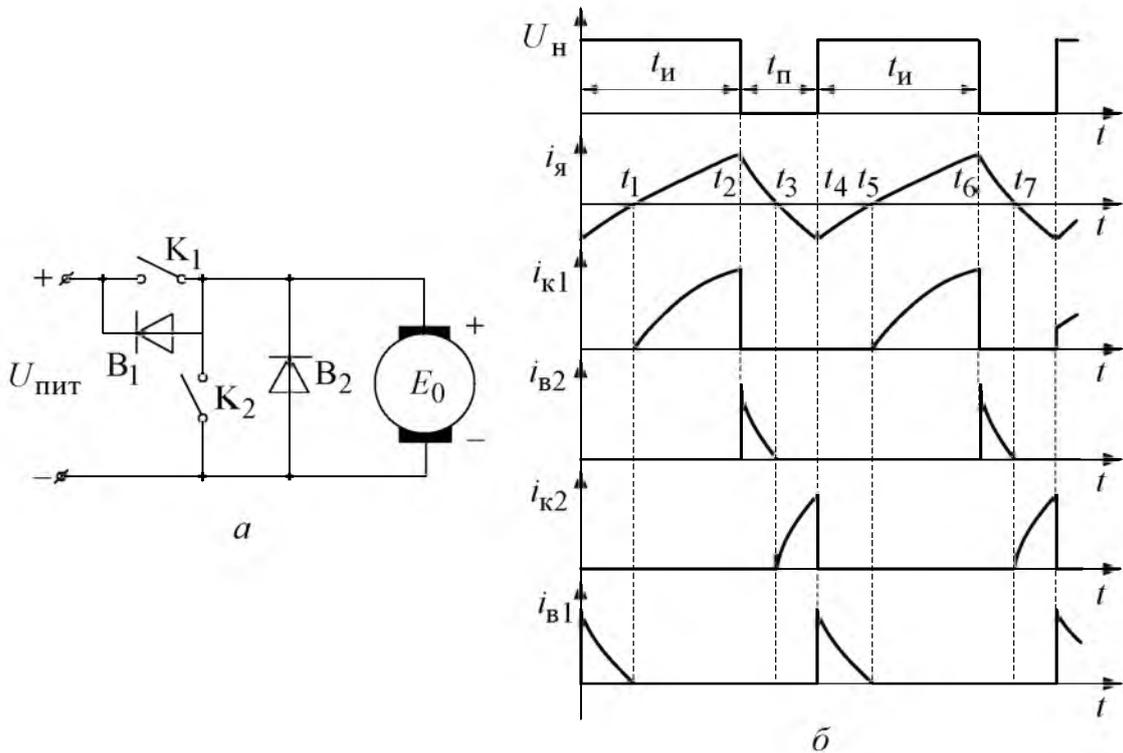


Рис. 6.4. Нереверсивный ИППТ с рекуперацией энергии

В схеме с параллельным ключевым элементом этот недостаток устраняется (рис. 6.5). В исходном состоянии конденсатор C заряжен до напряжения источника питания $U_{\text{пит}}$ через дроссель L и вентиль B .

При замыкании ключа K на интервале $0 \dots t_1$ через дроссель L от источника питания протекает ток и в магнитном поле запасается энергия. На интервале $t_1 \dots t_2$ ключ K разомкнут и энергия из магнитного поля дросселя L сбрасывается в конденсатор C под действием ЭДС самоиндукции, увеличивая его напряжение. Далее процесс повторяется.

При условии идеальности ключа K и вентиля B , а также считая $C \rightarrow \infty$, запишем уравнение электромагнитных процессов на интервале $0 \dots t_1$:

$$U_{\text{пит}} = L \frac{di_1}{dt} + i_1 R_{\Sigma} \quad (6.27)$$

и для интервала $t_1 \dots t_2$:

$$U_{\text{пит}} - U_H = L \frac{di_2}{dt} + i_2 R_{\Sigma}, \quad (6.28)$$

где $R_{\Sigma} = r_L + r_{\text{вн}}$; r_L – активное сопротивление обмотки дросселя; $r_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление источника питания.

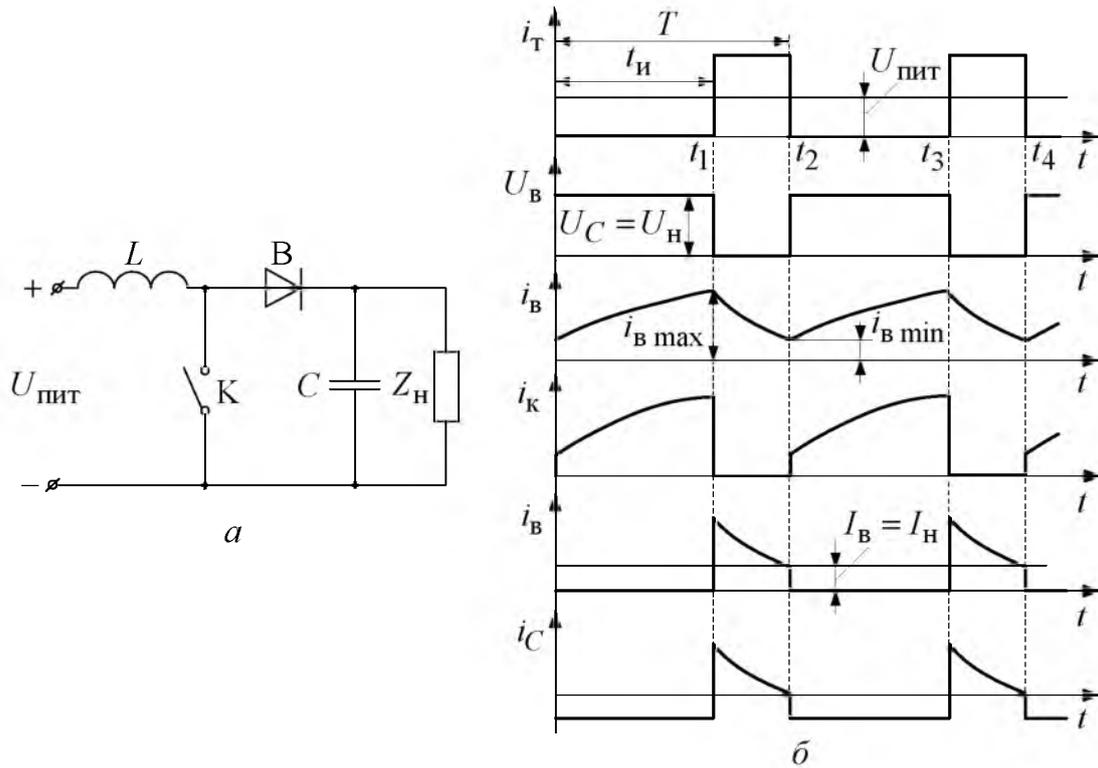


Рис. 6.5. Нереверсивный ИППТ повышающего типа

Решая уравнение (6.27; 6.28) относительно токов i_1 и i_2 , при ус-

ловии $i_1 \Big|_{t=0} = i_2 \Big|_{t=T}$ получаем:

$$i_1 = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_3} - \frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_3} \frac{\left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}} e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}}\right) e^{-\frac{tR_3}{L}}}{\left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}}\right)}, \quad (6.29)$$

$$i_2 = \frac{U_{\text{ПИТ}} - U_{\text{Н}}}{R_3} + \frac{U_{\text{Н}}}{R_3} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}}\right) e^{-\frac{tR_3}{L}}}{\left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}}\right)}, \quad (6.30)$$

$$i_{L \text{ max}} = i_{\text{к max}} = i_{\text{в max}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_3} - \frac{U_{\text{Н}}}{R_3} \frac{\left(e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}} - e^{-\frac{TR_3}{L}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}}\right)}, \quad (6.31)$$

$$i_{L \text{ min}} = i_{\text{к min}} = i_{\text{в min}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_3} - \frac{U_{\text{Н}}}{R_3} \frac{\left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}} e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}}\right)}. \quad (6.32)$$

Амплитуда пульсаций тока дросселя

$$\Delta i_L = i_{L \max} - i_{L \min} = \frac{U_H}{R_3} \frac{\left(e^{-\frac{TR_3}{L}} - e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}} \right) \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}} \right)}. \quad (6.33)$$

Среднее значение тока нагрузки

$$I_H = \frac{1}{T} \int_{t_{\text{и}}}^T i_2 dt = \frac{U_H - U_{\text{пит}}}{R_3} (1 - \gamma) + \frac{L U_H \left(e^{-\frac{TR_3}{L}} - e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}} \right) \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}} \right)}{R_3^2 T \left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}} \right)}. \quad (6.34)$$

Из рис. 6.5 находим:

$$U_H = \frac{E_{\text{пит}}}{1 - \gamma} - \frac{r_{\text{вн}} I_H}{(1 - \gamma)^2}, \quad (6.35)$$

$$U_{\text{пит}} = E_{\text{пит}} - \frac{r_{\text{вн}} I_H}{1 - \gamma}. \quad (6.36)$$

Исследуя функцию (6.35) на экстремум, находим:

$$U_{H \max} = \frac{E_{\text{пит}}^2}{4 r_{\text{вн}} I_H}. \quad (6.37)$$

Пренебрегая пульсациями тока нагрузки, т. е. считая, что $I_H = I_C = \text{const}$, находим пульсации выходного напряжения:

$$\Delta U_H = \Delta U_C = \frac{1}{C} \int_0^{t_{\text{и}}} I_C dt = \frac{I_H t_{\text{и}}}{C}. \quad (6.38)$$

Помножив (6.38) на $\frac{T}{T}$, получим:

$$\Delta U_H = \frac{I_H \gamma}{C f}. \quad (6.39)$$

При прочих равных условиях величина пульсаций ΔU_H снижается с увеличением частоты f . Этот параметр ограничен свойствами применяемых в этой схеме ключевых и других силовых элементов. Для устранения этого недостатка иногда прибегают к использованию многофазных преобразователей (рис. 6.6), представляющих собой n однофазных, работающих на одну нагрузку и от одного источника питания. Дроссель L в этом случае имеет n магнитосвязанных обмоток w_1, w_2, \dots, w_n . Частота пульсаций выходного напряжения в этой схеме в n раз выше, чем в однофазной, в результате чего улучшаются технико-экономические показатели преобразователя.

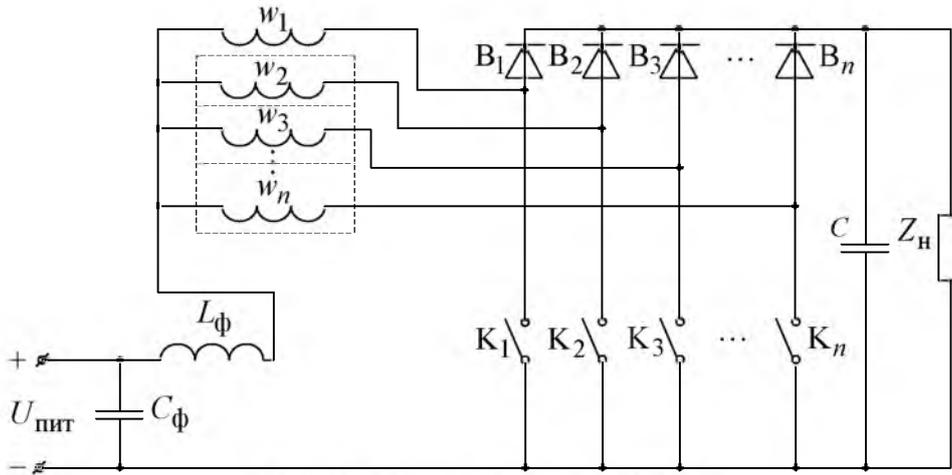


Рис. 6.6. Многофазный ИППТ

Для расширения диапазона регулирования выходного напряжения в рассматриваемом классе преобразователей иногда используются двухобмоточные дроссели с автотрансформаторной связью (рис. 6.7).

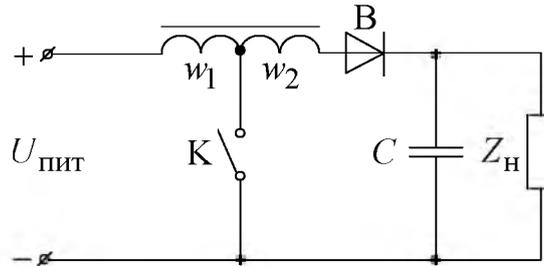


Рис. 6.7. ИППТ с автотрансформаторной связью

Существенное увеличение выходного напряжения здесь может быть достигнуто подбором соотношения $\frac{w_1}{w_1 + w_2}$ витков обмотки дросселя L .

Рассмотрим ещё одну схему импульсного преобразователя энергии постоянного тока (рис. 6.8), когда ключевой элемент подсоединён последовательно с цепью нагрузки, а дроссель L – параллельно.

Ключ K замкнут на интервале $0 \dots t_1$, при этом в дросселе L протекает ток i_{L_1} и в его магнитном поле запасается энергия. На интервале $t_1 \dots t_2$ ключ K разомкнут, а энергия, накопленная в дросселе, сбрасывается в конденсатор C .

Далее процесс повторяется. Уравнения электромагнитных процессов имеют вид:

- для интервала $0 \dots t_1$

$$U_{\text{пит}} = L \frac{di_{L_1}}{dt} + i_{L_1} R_{\text{эл}}; \quad (6.40)$$

- для интервала $t_1 \dots t_2$

$$U_H = L \frac{di_{L2}}{dt} + i_{L2} R_{\Sigma 2}, \quad (6.41)$$

где $R_{\Sigma 1} = r_L + r_{\text{вн}}$; $R_{\Sigma 2} = r_L + r_{\text{в}}$; $R_{\Sigma 2} = r_L + r_{\text{в}}$, где r_L – активное сопротивление обмотки дросселя; $r_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление источника питания; $r_{\text{в}}$ – прямое сопротивление вентиля В.

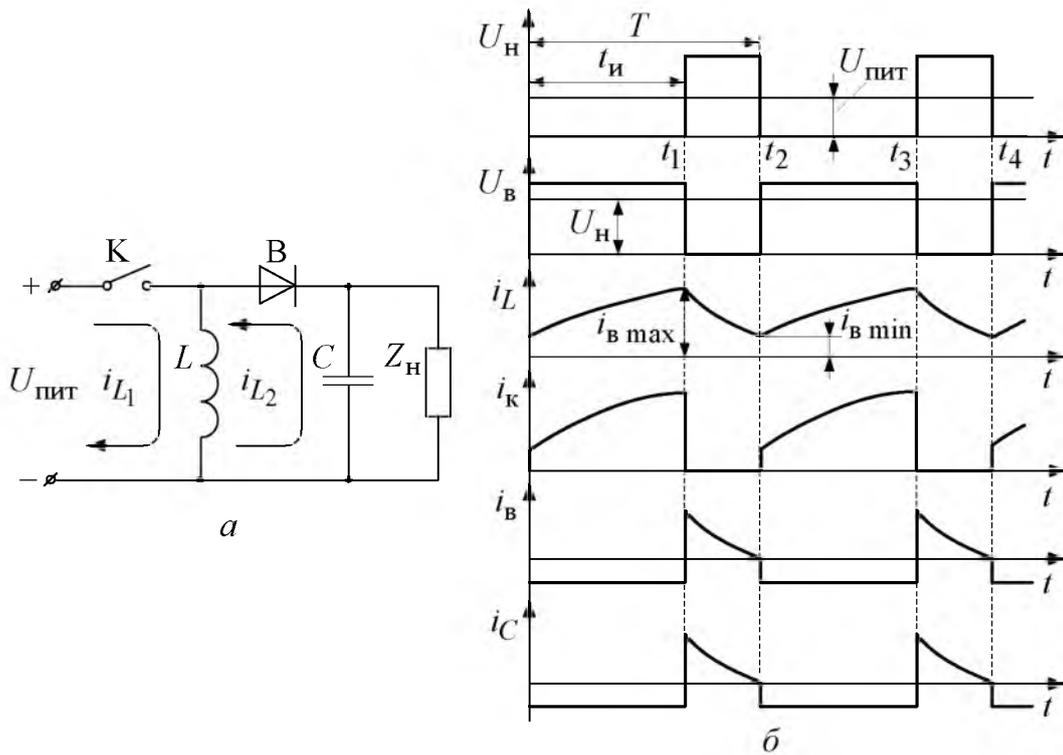


Рис. 6.8. ИППТ повышающе-понижающего типа

С учетом того, что $i_{L1} \Big|_{t=0} = i_{L2} \Big|_{t=T}$, а также считая, что $R_{\Sigma 1} \approx R_{\Sigma 2} \approx R_{\Sigma}$, решаем уравнения (6.40, 6.41) относительно токов i_{L1} и i_{L2} :

$$i_{L1} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\Sigma}} - \frac{(U_{\text{пит}} + U_H) \left(1 - e^{-\frac{TR_{\Sigma}}{L}} e^{\frac{\gamma TR_{\Sigma}}{L}} \right)}{R_{\Sigma} \left(1 - e^{-\frac{TR_{\Sigma}}{L}} \right)} e^{-\frac{R_{\Sigma} t}{L}}, \quad (6.42)$$

$$i_{L2} = \frac{(U_{\text{пит}} + U_H) \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\Sigma}}{L}} \right)}{R_{\Sigma} \left(1 - e^{-\frac{TR_{\Sigma}}{L}} \right)} e^{\frac{R_{\Sigma} t}{L}} - \frac{U_H}{R_{\Sigma}}, \quad (6.43)$$

$$i_{L \min} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_3} - \frac{(U_{\text{пит}} + U_{\text{н}}) \left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}} e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}}\right)}{R_3 \left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}}\right)}, \quad (6.44)$$

$$i_{L \max} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_3} - \frac{(U_{\text{пит}} + U_{\text{н}}) \left(e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}} - e^{-\frac{TR_3}{L}}\right)}{R_3 \left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}}\right)}, \quad (6.45)$$

Амплитуда пульсаций тока дросселя

$$\Delta i_L = i_{L \max} - i_{L \min} = \frac{(U_{\text{пит}} + U_{\text{н}}) \left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}} e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}}\right) \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}}\right)}{R_3 \left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}}\right)}. \quad (6.46)$$

Среднее значение тока нагрузки

$$I_{\text{н}} = \frac{1}{T} \int_0^{T-t_{\text{и}}} i_{L_2} dt = \frac{(U_{\text{пит}} + U_{\text{н}}) L \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}}\right) \left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}} e^{-\frac{\gamma TR_3}{L}}\right)}{R_3^2 T \left(1 - e^{-\frac{TR_3}{L}}\right)} - \frac{U_{\text{н}}}{R_3} (1 - \gamma). \quad (6.47)$$

Из диаграмм на рис. 6.8 получаем:

$$U_{\text{н}} = \frac{\gamma}{1 - \gamma} \left(E_{\text{пит}} - \frac{\gamma}{1 - \gamma} r_{\text{в}} I_{\text{н}} - \frac{1}{\gamma(1 - \gamma)} r_{\text{л}} I_{\text{н}} \right), \quad (6.48)$$

$$U_{\text{пит}} = E_{\text{пит}} - \frac{\gamma}{1 - \gamma} r_{\text{вн}} I_{\text{н}}. \quad (6.49)$$

Так же, как и в предыдущей схеме, величина пульсации выходного напряжения

$$\Delta U_{\text{н}} = \Delta U_{\text{с}} \frac{I_{\text{н}} \gamma}{C f}. \quad (6.50)$$

Особенностью рассмотренной схемы ИППТ является то, что полярность напряжения на нагрузке противоположная, инверсная по отношению к полярности и напряжению источника питания, поэтому такой преобразователь иногда называют инвертирующим.

Еще одним вариантом повышающее-понижающего ИППТ является схема Кука (рис. 6.9).

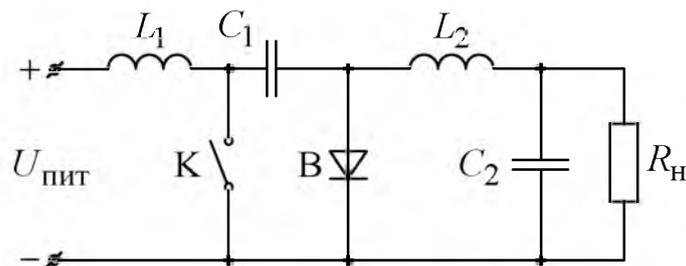


Рис. 6.9. Преобразователь Кука

В исходном состоянии ключ К разомкнут, а конденсатор C_1 заряжен через дроссель L_1 и вентиль В от источника питания $U_{\text{пит}}$. При замыкании ключа К в дросселе L_1 нарастает ток и запасается энергия. При этом конденсатор C_1 через ключ К и дроссель L_2 передает энергию в накопительный конденсатор C_2 . При размыкании ключа К накопленная в дросселе L_1 энергия через вентиль В сбрасывается в конденсатор C_1 далее процесс повторяется.

Особенностью этой схемы является:

- непрерывный характер выходного тока;
- непрерывный характер тока дросселя L_2 ;
- возможность уменьшения пульсаций выходного напряжения при создании магнитной связи между дросселями L_1 и L_2 ;
- также как и в предыдущей схеме ИППТ, выходное напряжение инверсно по отношению напряжению источника питания. Если это нежелательно или даже недопустимо, то можно поменять местами вентиль В и дроссель L_2 (рис. 6.10). Такой ИППТ получил название преобразователя типа *SEPIC*.

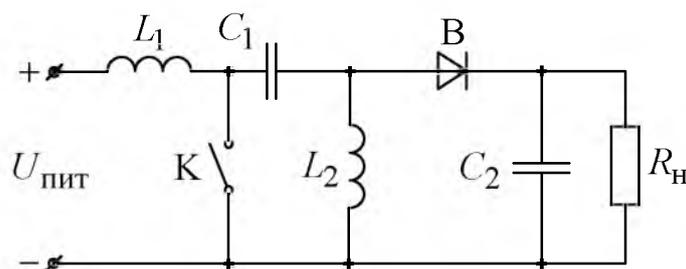


Рис. 6.10. Преобразователь типа *SEPIC*

У всех рассмотренных схем ИППТ имеется одна и та же особенность – гальваническая связь источника питания с нагрузкой. Если это нежелательно, то ее можно устранить при помощи трансформатора, первичная обмотка которого через ключ К подсоединяется к источнику питания, а вторичная – в цепь нагрузки (рис. 6.11)

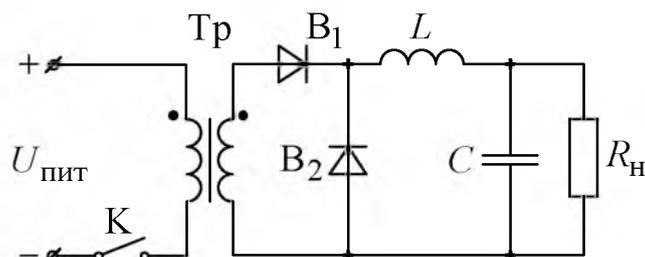


Рис. 6.11. Прямоходовой преобразователь

В первом случае (рис. 6.11) при замыкании ключа К к первичной обмотке трансформатора прикладывается напряжение источника питания $U_{\text{пит}}$, а на вторичной обмотке наводится ЭДС, отличающаяся от напряжения $U_{\text{пит}}$ в $k_{\text{тр}}$ раз, где $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации трансформатора. Это напряжение является входным для схемы ИППТ и, как уже было рассмотрено ранее, преобразуется в выходное напряжение на нагрузке. Это дает возможность облегчить согласование напряжения источника питания $U_{\text{пит}}$ и выходного напряжения за счет подбора коэффициента трансформации, а кроме того, размещая на вторичной стороне трансформатора несколько различных обмоток, можно получить несколько гальванически развязанных выходных напряжений. В этой схеме трансформатор используется по своему прямому назначению и такой преобразователь называется прямоходовым, т. к. передача энергии из источника питания в цепь нагрузки происходит при замкнутом состоянии ключа К.

В схеме (рис. 6.12) при замыкании ключа К энергия в нагрузку не передается, т. к. вентиль В для этой полярности напряжения будет заперт. При этом ток в первичной обмотке будет нарастать, и в магнитном поле трансформатора будет накапливаться энергия. При размыкании ключа К полярность напряжения изменится на противоположную, и, накопленная энергия будет сброшена в цепь нагрузки, обеспечивая определенный уровень выходного напряжения. Здесь передача энергии в цепь нагрузки осуществляется при разомкнутом состоянии ключа К, а трансформатор используется как накопительный индуктивный элемент. Такой преобразователь называют обратноходовым.

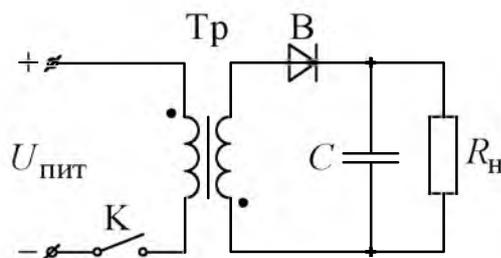


Рис. 6.12. Обратноходовой преобразователь

6.2. РЕВЕРСИВНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для осуществления наряду с регулированием тока нагрузки еще и реверса служат реверсивные преобразователи. Обычно их выполняют на базе мостовой схемы (рис. 6.13), состоящей из ключей $K_1 - K_4$ и вентилей обратного тока $V_1 - V_4$.

В схеме возможны следующие способы управления:

1. Способ симметричного управления.
2. Способ несимметричного управления.
3. Способ поочередного управления.

Симметричный способ иллюстрируется диаграммами рис. 6.13.

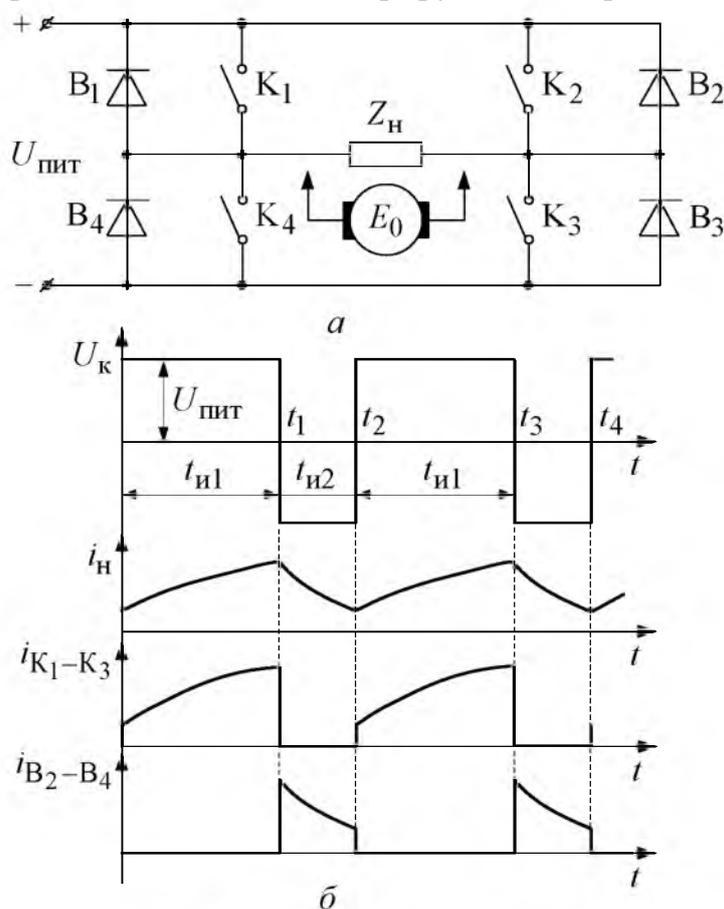


Рис. 6.13. Реверсивный ИППТ

На интервале $0 \dots t_1$ открыты ключи K_1 и K_3 , и по нагрузке под действием напряжения источника питания протекает ток $i_{K_1-K_3}$. На интервале $t_1 \dots t_2$ ключи K_1 и K_3 закрываются, а открываются ключи K_2 и K_4 . Напряжение на нагрузке меняет полярность, а ток нагрузки под действием ЭДС самоиндукции протекает через вентили V_2 и V_4 в

источник питания. Далее процессы повторяются. Среднее значение напряжения на нагрузке

$$U_H = \frac{U_{\text{пит}} t_{и1}}{T} - \frac{U_{\text{пит}} t_{и2}}{T} = U_{\text{пит}} (2\gamma - 1), \quad (6.51)$$

где $\gamma = \frac{t_{и1}}{T}$.

При активно-индуктивной нагрузке уравнение электромагнитных процессов при допущениях п. 6.1. имеет вид:

$$\pm U_{\text{пит}} = i_H R_H + L_H \frac{di_H}{dt}, \quad (6.52)$$

где (+) соответствует интервалу $0 \dots t_1$, а (-) интервалу $t_1 \dots T$.

Решая (6.52) относительно i_H и учитывая, что $i_H \Big|_{t=0} = i_H \Big|_{t=T}$,

получаем:

$$i_{H1} \Big|_{0 \dots t_1} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_H} \left[1 - \frac{2 \left(1 - e^{-\frac{TR_H}{L_H}} e^{-\frac{\gamma TR_H}{L_H}} \right) \frac{R_H t}{L_H}}{\left(1 - e^{-\frac{TR_H}{L_H}} \right)} \right] \quad (6.53)$$

$$i_{H2} \Big|_{t_1 \dots T} = -\frac{U_{\text{пит}}}{R_H} \left[1 + \frac{2 \left(e^{-\frac{\gamma TR_H}{L_H}} - 1 \right) \frac{R_H t}{L_H}}{\left(1 - e^{-\frac{TR_H}{L_H}} \right)} \right], \quad (6.54)$$

$$i_{H \max} = i_{к \max} = i_{в \max} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_H} \frac{\left(1 + e^{-\frac{TR_H}{L_H}} - 2e^{-\frac{\gamma TR_H}{L_H}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_H}{L_H}} \right)}, \quad (6.55)$$

$$i_{H \min} = i_{к \min} = i_{в \min} = -\frac{U_{\text{пит}}}{R_H} \frac{\left(1 + e^{-\frac{TR_H}{L_H}} - 2e^{-\frac{TR_H}{L_H}} e^{-\frac{\gamma TR_H}{L_H}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_H}{L_H}} \right)}. \quad (6.56)$$

Амплитуда пульсации тока нагрузки

$$\Delta i_H = i_{H \max} - i_{H \min} = \frac{2U_{\text{пит}}}{R_H} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_H}{L_H}} \right) \left(1 - e^{-\frac{TR_H}{L_H}} e^{-\frac{\gamma TR_H}{L_H}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_H}{L_H}} \right)}. \quad (6.57)$$

Амплитуда пульсаций выходного напряжения $\Delta U_{\text{H}} = \Delta i_{\text{H}} R_{\text{H}}$.

Коэффициент пульсации

$$K_{\text{П}} = \frac{\Delta U_{\text{H}}}{U_{\text{ПИТ}}} = \frac{2 \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}}\right) \left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}} e^{-\frac{\gamma TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{H}}}{L_{\text{H}}}}\right)}. \quad (6.58)$$

Среднее значение тока нагрузки $I_{\text{H}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_{\text{H}}} (2\gamma - 1)$.

При работе на двигатель постоянного тока с противоЭДС E_0 исходные уравнения принимают вид:

$$\pm (U_{\text{ПИТ}} - E_0) = i_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt}, \quad (6.59)$$

где $R_{\text{я}}$, $L_{\text{я}}$ – активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря.

Из (6.59) получаем:

$$i_{\text{я1}} \Big|_{0 \dots t_1} = \frac{U_{\text{ПИТ}} - E_0}{R_{\text{я}}} \left[1 - \frac{2 \left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}} e^{-\frac{\gamma TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}}\right) e^{-\frac{R_{\text{я}} t}{L_{\text{я}}}}}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}}\right)} \right], \quad (6.60)$$

$$i_{\text{я2}} \Big|_{t_1 \dots T} = -\frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_{\text{я}}} \left[\left(1 - \frac{E_0}{U_{\text{ПИТ}}}\right) + \frac{2 \left(e^{-\frac{\gamma TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}} - 1\right) e^{-\frac{R_{\text{я}} t}{L_{\text{я}}}}}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}}\right)} \right], \quad (6.61)$$

$$i_{\text{я max}} = \frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_{\text{я}}} \frac{\left(1 + e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}} - 2e^{-\frac{\gamma TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}}\right)} - \frac{E_0}{R_{\text{я}}}, \quad (6.62)$$

$$i_{\text{я min}} = -\frac{U_{\text{ПИТ}}}{R_{\text{я}}} \frac{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}} - 2e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}} e^{-\frac{\gamma TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}}\right)} - \frac{E_0}{R_{\text{я}}}. \quad (6.63)$$

Амплитуда пульсации тока якоря

$$\Delta i_{\text{я}} = i_{\text{я max}} - i_{\text{я min}} = \frac{2U_{\text{ПИТ}}}{R_{\text{я}}} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}}\right) \left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}} e^{-\frac{\gamma TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}}\right)}. \quad (6.64)$$

Среднее значение тока якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{я}}} \left(2\gamma - 1 - \frac{E_0}{U_{\text{пит}}} \right). \quad (6.65)$$

Коэффициент пульсации выходного напряжения

$$k_{\text{п}} = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{U_{\text{пит}}} = \frac{\Delta i_{\text{я}} R_{\text{я}}}{U_{\text{пит}}} = \frac{2 \left(1 - e^{-\frac{\gamma TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}} \right) \left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}} e^{\frac{\gamma TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{TR_{\text{я}}}{L_{\text{я}}}} \right)}. \quad (6.66)$$

Недостатком способа *симметричного* управления является изменение полярности выходного напряжения и высокий коэффициент пульсаций, требующий повышенной установленной мощности выходных фильтров.

Несимметричный способ управления (рис. 6.14) характеризуется тем, что в одном плече моста силовые ключи работают в противофазе, например, K_1 и K_4 , в другом плече один ключ постоянно замкнут (K_3), а второй разомкнут (K_2). Тогда на интервале $0 \dots t_1$ в случае активно-индуктивной нагрузки через ключи K_1 и K_3 протекает ток от источника питания, а в индуктивной нагрузке запасается энергия. На интервале $t_1 \dots t_2$ ключ K_1 закрыт, а открыт ключ K_4 , и под действием ЭДС самоиндукции в индуктивности нагрузки ток будет протекать через постоянно открытый ключ K_3 и вентиль V_4 , минуя цепь источника питания. Далее процесс повторяется.

Если преобразователь нагружен на двигатель постоянного тока, то на интервале $0 \dots t_1$ ток протекает от источника питания в якорную цепь двигателя через замкнутые ключи K_1 и K_3 , преодолевая противоЭДС E_0 . При этом в индуктивности якорной обмотки двигателя накапливается энергия. В точке t_1 ключ K_1 размыкается, а замыкается ключ K_4 , и под действием ЭДС самоиндукции якорной обмотки ток будет протекать в прежнем направлении до точки t'_2 , пока не иссякнет запасенная энергия. При этом ток протекает через ключ K_3 и вентиль V_4 . В точке t'_2 ток якорной цепи меняет направление на противоположное и на участке $t'_2 - t_2$ будет протекать через ключ K_4 и вентиль V_3 под действием ЭДС якорной обмотки E_0 . При этом энергия снова запасается в индуктивности якорной обмотки, и когда в точке t_2 размыкается ключ K_4 , а замыкается снова ключ K_1 , ток от источника

питания протекать не сможет до точки t'_3 , т. к. ЭДС самоиндукции якорной обмотки, складываясь с ЭДС E_0 , превышает напряжение источника $U_{\text{пит}}$, и ток будет протекать через вентили B_1 и B_3 через источник питания. При этом поток энергии направлен из электрической машины в источник питания.

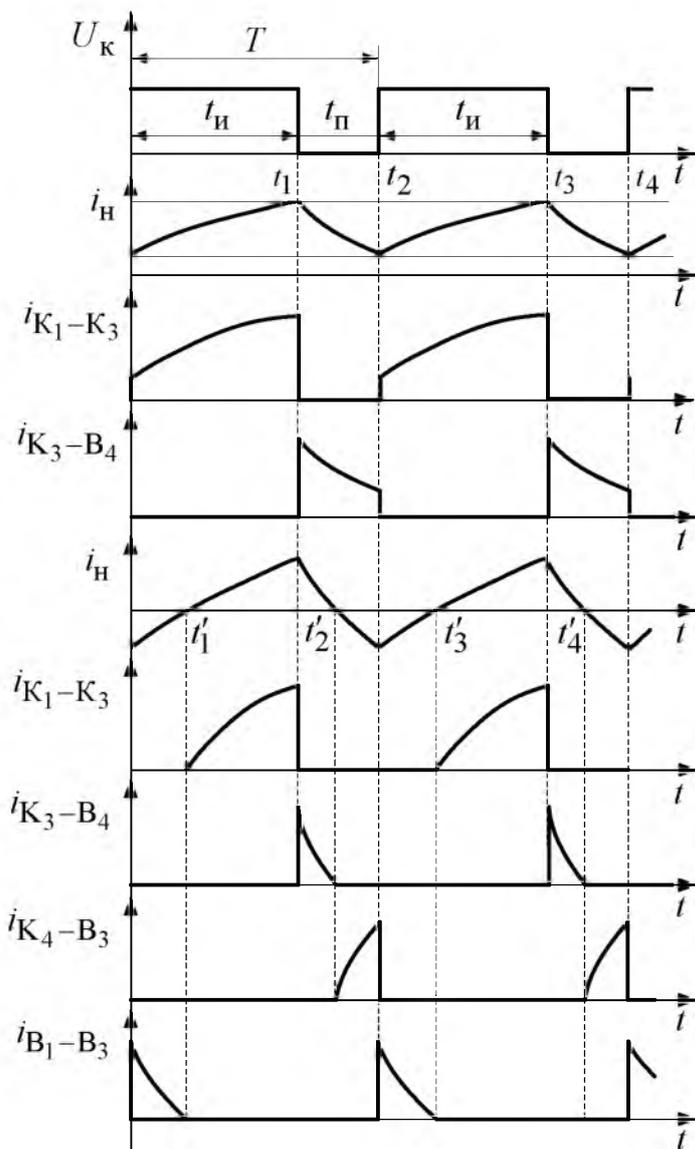


Рис. 6.14. Несимметричный способ управления реверсивным ИППТ

Из диаграммы рис. 6.14 следует, что при несимметричном способе управление имеет место неравномерная нагрузка по току силовых элементов схемы.

Поскольку напряжение на нагрузке имеет вид однополярных импульсов, то коэффициент пульсаций выходного напряжения в этом случае определяется по (6.12), что значительно меньше, чем в случае

симметричного управления. Для осуществления реверса необходимо поменять местами законы управления ключами плечей моста: ключи K_2 и K_3 открывать и закрывать в противофазе; ключ K_1 все время закрыт, ключ K_4 все время открыт.

При *поочередном способе управления* (рис. 6.15) ключи одной диагонали моста все время разомкнуты (например, K_2 и K_4), а ключи второй диагонали K_1 и K_3 переключаются с частотой, вдвое меньшей частоты импульсов выходного напряжения.

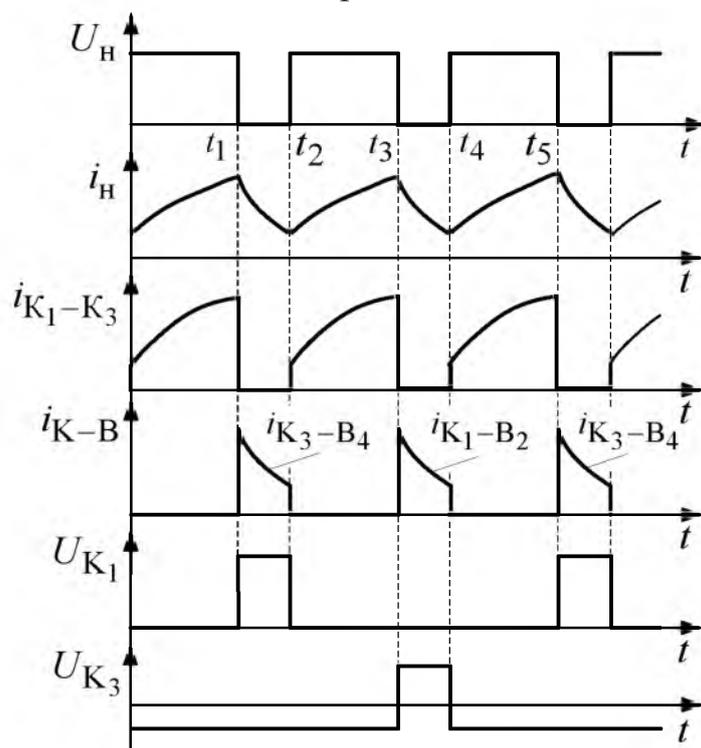


Рис. 6.15. Поочередный способ управления реверсивным ИППТ

Так, на участке $0 \dots t_1$ открыты ключи K_1 и K_3 и по нагрузке от источника питания протекает ток i_n . В точке t_1 выключается ключ K_1 , а ключ K_3 продолжает находиться в открытом состоянии до точки t_3 . На интервале $t_1 \dots t_2$ ток нагрузки под действием ЭДС самоиндукции протекает через ключ K_3 и вентиль B_4 . В точке t_2 снова включается ключ K_1 , и ток нагрузки снова протекает за счет напряжения источника питания $U_{пит}$ на интервале $t_2 \dots t_3$. В точке t_3 размыкается ключ K_3 , а ключ K_1 продолжает находиться в открытом состоянии. Ток нагрузки под действием ЭДС самоиндукции протекает через вентиль B_2 и ключ K_1 на интервале $t_3 \dots t_4$, а в точке t_4 снова включается ключ K_3 ,

и весь процесс повторяется. Выходное напряжение при этом способе управления имеет вид однополярных импульсов и его коэффициент пульсаций определяется по (6.12). Электромагнитные процессы в этом случае полностью идентичны рассмотренным в п. 4.1 при исследовании преобразователя с последовательным ключевым элементом, и поэтому расчетные выражения (6.4)–(6.11) могут быть использованы для выбора элементов силовой части при работе на активно-индуктивную нагрузку, а (6.15)–(6.23) – при работе на двигатель постоянного тока.

Для осуществления реверса при поочередном способе управления необходимо ключи K_1 и K_3 разомкнуть, а поочередно управлять ключами K_2 и K_4 .

Из рассмотренных способов управления следует, что способы симметричного и несимметричного управления обеспечивают двухсторонний обмен энергией между источником питания и нагрузкой, а способ поочередного управления такой возможности не обеспечивает. Во всех рассмотренных схемах импульсных преобразователей постоянного тока в качестве силовых ключей используются либо полностью управляемые вентили (транзисторы, двухоперационные тиристоры), либо однооперационные тиристоры-вентили с неполной управляемостью, но снабженные специальными коммутационными узлами, обеспечивающими выключение тиристора в любой момент времени. Различные способы осуществления коммутации тиристоров рассмотрены в п. 4.2.

В зависимости от типа коммутационного узла, применяемого в тиристорных преобразователях постоянного тока, различают одноступенчатую и двухступенчатую коммутацию. В схемах с одноступенчатой коммутацией используют принципы запираания тиристоров при помощи последовательного или параллельного LC -контура (рис. 4.12, 4.13), и поэтому длительность импульсов напряжения постоянна, определяется параметрами коммутирующего контура и регулироваться не может.

Регулирование выходного напряжения в этих схемах может осуществляться только частотно-импульсным способом ($t_{и} = \text{const}$;

$T = \frac{1}{f} = \text{var}$). В схемах с двухступенчатой коммутацией для запираания

силового тиристора используется специальный коммутационный ключ (схемы рис. 4.14–4.16), и поэтому здесь могут применяться все три способа регулирования выходного напряжения.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы простейшего импульсного преобразователя постоянного тока (ИППТ).
2. Особенности работы ИППТ на двигательную нагрузку.
3. Поясните процесс рекуперативного торможения двигателя в нереверсивном ИППТ.
4. ИППТ повышающего типа. Принцип действия
5. Многофазные ИППТ. Особенности работы.
6. Особенности ИППТ с трансформаторной связью.
7. ИППТ повышающе-понижающего типа.
8. Схема Кука и ее основные особенности.
9. Схема преобразователя тока *SEPIC* и ее основные особенности.
10. ИППТ с трансформаторной развязкой входа и выхода. Прямоходовой преобразователь. Основные особенности.
11. Обратногоходовой преобразователь. Основные особенности.
12. Объясните принцип симметричного управления реверсивным ИППТ.
13. Объясните принцип несимметричного управления реверсивным ИППТ.
14. Объясните принцип поочередного управления реверсивным ИППТ.