12.4.3. Широтно-импульсная модуляция

При широтно-импульсном способе формирование кривой выходного напряжения АИН осуществляется с помощью последовательности высокочастотных импульсов разных длительности и полярности. Длительность составляющих импульсов изменяется таким образом, что их среднее значение изменяется по заданному закону: синусоидальному, трапецеидальному, треугольному или прямоугольному.

Различают два типа широтно-импульсной модуляции (ШИМ):

1) однополярная ШИМ.

2) двухполярная ШИМ.

При однополярной ШИМ выходное напряжение формируется из последовательности однополярных импульсов (рис. 12.25) на полупериоде низкочастотной составляющей выходного напряжения. В этом случае при формировании импульса система управления должна обеспечить открытое состояние двух накрест расположенных по отношению к нагрузке ключевых элементов (рис. 12.10). Для образования паузы при активно-индуктивной нагрузке схема управления должна обеспечить протекание тока нагрузки через два вентиля, подключающих нагрузку накоротко к одной из шин источника питания (например, открытое состояние *VT1* и *VD3*).

При двухполярной ШИМ паузы однополярной ШИМ заполняются импульсами противоположной полярности (рис. 12.26). При

Рис. 12.25

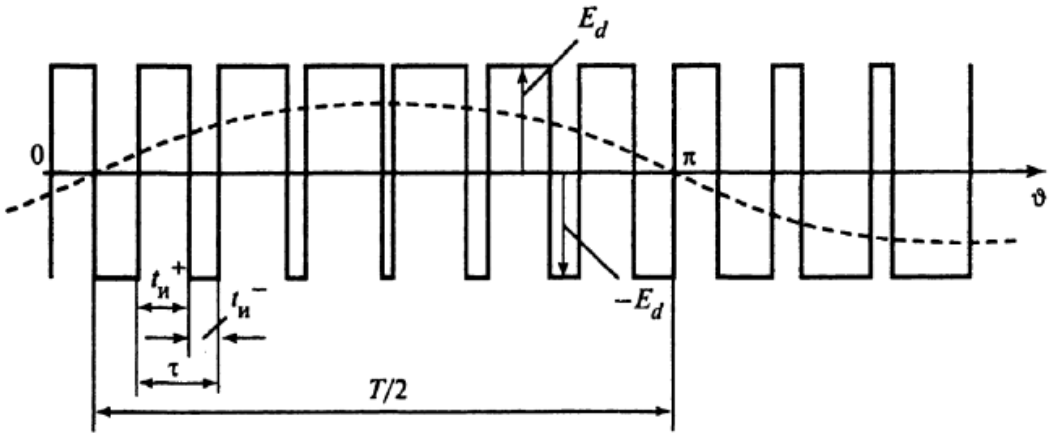


Рис. 12.26

таком способе формирования выходного напряжения АИН всегда открыты два диагонально расположенных вентиля в схеме рис. 12.10 (два транзистора или два диода). В этом случае к нагрузке всегда прикладывается напряжение питания источника постоянного напряжения E_d с той или иной полярностью.

Гармонический анализ показывает, что спектр напряжения при однополярной ШИМ лучше, чем спектр напряжения при двухполярной ШИМ. Чем выше частота высокочастотной составляющей (несущей частоты) по сравнению с низкочастотной (частоты основной гармоники), тем ближе огибающая выходного напряжения приближается к синусоиде, тем легче отфильтровать высокочастотную составляющую выходного напряжения.

Из рис. 12.26 следует: $t_{\text{и}}^{+} + t_{\text{и}}^{-} = \tau$, где τ — период высокочастотной составляющей.

Среднее значение напряжения на периоде высокочастотной составляющей, являющееся мгновенным значением низкочастотной составляющей напряжения на нагрузке $u_{\text{н}}$, находим из выражения

$$u_{\text{н}} = \frac{1}{\tau}\left[\int_0^{t_{\text{и}}^{+}} E_d \, \mathrm{d}\vartheta + \int_0^{t_{\text{и}}^{-}} (-E_d) \, \mathrm{d}\vartheta\right] = E_d \, \frac{t_{\text{и}}^{+} - t_{\text{и}}^{-}}{\tau}. \qquad (12.16)$$

Если изменять соотношение между длительностями положительных и отрицательных высокочастотных импульсов по синусоидальному закону $\dfrac{t_{\text{и}}^{+} - t_{\text{и}}^{-}}{\tau} = \nu \sin(\Omega t)$, то огибающая низкочастотной составляющей напряжения на нагрузке также будет изменяться по синусоидальному закону

$$u_{\text{н}} = E_d \nu \sin(\Omega t),$$

где Ω — угловая частота низкочастотного напряжения на нагрузке; ν — коэффициент модуляции, принимающий значения в пределах 0—1.

Очевидно, что в этом случае амплитуда низкочастотной составляющей напряжения будет изменяться от нуля до E_d. Физический смысл коэффициента модуляции заключается в том, что при $\nu = 1$ $t_{\text{и}}^{+}$ изменяется от нуля до τ и мгновенное значение низкочастотной составляющей изменяется от нуля до E_d. При $\nu = 1$ $t_{\text{и}}^{+} = t_{\text{и}}^{-}$ и амплитуда низкочастотной составляющей равна нулю. Таким образом, при изменении длительности составляющих импульсов изменяется и амплитуда низкочастотной составляющей напряжения на нагрузке.

2.3.1. Описание принципа ШИМ

Содержание высших гармоник может быть существенно снижено при использовании широтно-импульсной модуляции (ШИМ), при которой кривая выходного напряжения инвертора формируется в виде импульсов, промодулированных по синусоидальному закону (рис. 2.8, *а*). Применение ШИМ обеспечивает преимущественное содержание в кривой выходного напряжения основной гармоники $\omega_{вых}$ и минимальное содержание высших гармоник с близкими к основной гармонике частотами (в частности, 3, 5, 7-й), хотя амплитуды гармоник более высоких частот могут быть значительны. Но эти гармоники могут быть легко отфильтрованы с помощью простейших фильтров, устанавливаемых перед нагрузкой. Регулирование выходного напряжения (действующего значения его первой гармоники) осуществляется путем изменения ширины выходных импульсов (глубины модуляции). Детализация принципа ШИМ показана на рис. 2.9.

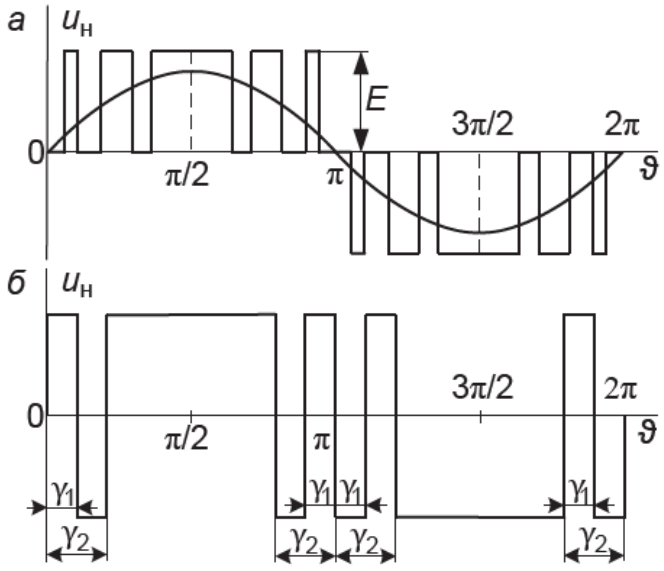


Рис. 2.8. Диаграммы выходного напряжения АИН при однополярной (*а*) и двуполярной (*б*) ШИМ

Кривая выходного напряжения, показанная на рис. 2.8, *а*, характеризует однополярную ШИМ, т. к. выходные импульсы в течение полупериода имеют одинаковую полярность. Применяется также двуполярная ШИМ, при которой вместо пауз в кривой выходного напряжения на рис. 2.8, *а* содержатся импульсы противоположной полярности.

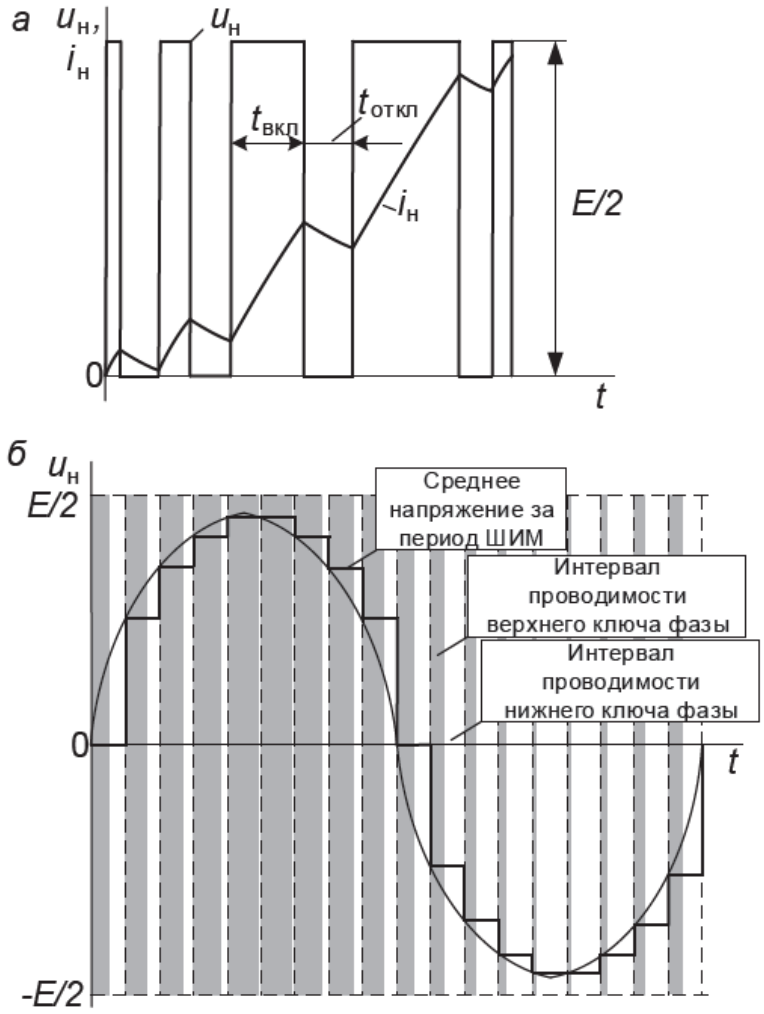


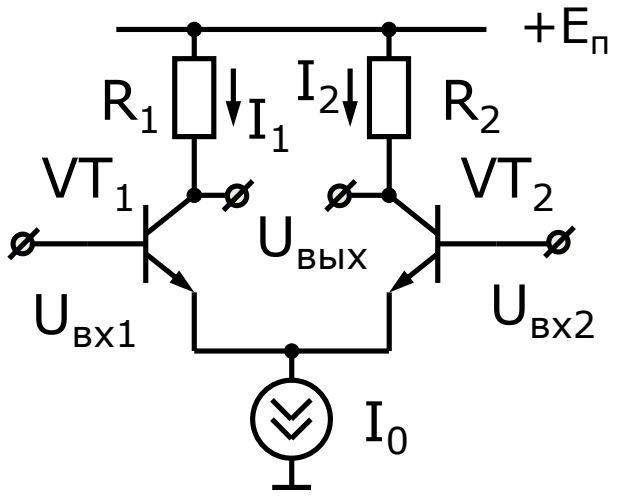
Рис. 2.9. Детализация принципа ШИМ:

а — принцип формирования уровня сигнала с помощью изменения соотношения интервалов длительности импульса и длительности паузы;
б — принцип формирования синусоидального сигнала

На рис. 2.8, *б* показана двухполярная кривая выходного напряжения, получаемая одним из методов улучшения гармонического состава выходного напряжения. Поскольку он обеспечивает исключение некоторых, в частности наиболее нежелательных низших гармоник

Операционный усилитель

- ОУ – был создан для работы с аналоговыми сигналами – осуществляет математические операции над ними. Однако функциональные возможности оказались настолько широки, что применяется до сих пор в аналоговой технике основан на дифференциальном усилителе.



Дифференциальный каскад

$$R_1 = R_2$$

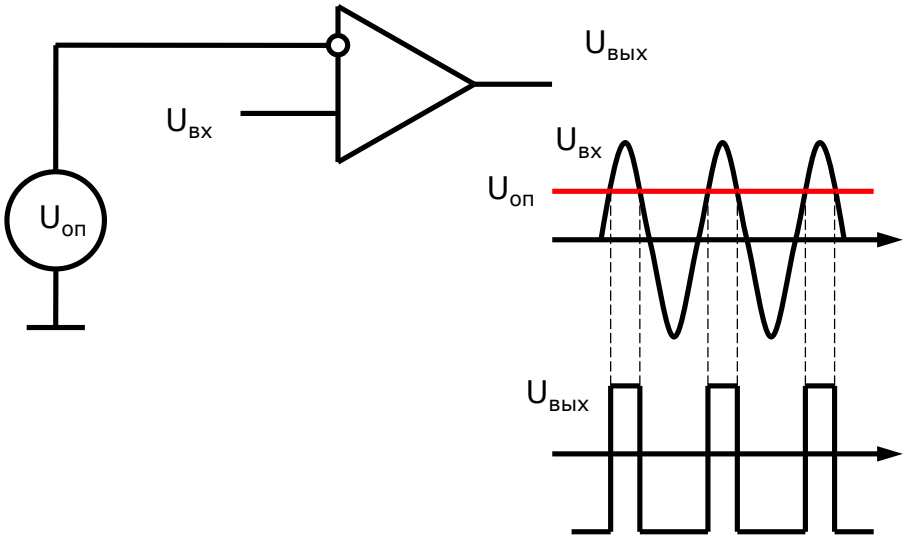
$$I_0 = I_1 + I_2$$

Если $U_{вх1} = U_{вх2}$

то $I_1 = I_2$ и $U_{вых} = 0$

$$U_{вых} = K_U(U_{вх1} - U_{вх2})$$

Компаратор на основе ОУ



(3-й и 5-й или 5-й и 7-й), его называют *методом избирательного исключения гармоник*.

Метод основывается на задании фиксированных углов γ_1 и γ_2 переключения тиристоров в инверторе. При $\gamma_1 = 23{,}62^\circ$ и $\gamma_2 = 33{,}3^\circ$ в кривой выходного напряжения отсутствуют 3-я и 5-я гармоники, а при $\gamma_1 = 16{,}25^\circ$ и $\gamma_2 = 22{,}07^\circ$ — 5-я и 7-я.

Регулирование выходного напряжения можно производить либо по цепи питания, либо с помощью самого инвертора путем изменения фазового сдвига сигналов управления одной пары тиристоров полумоста относительно сигналов управления другой пары при переключении тиристоров в каждом полумосте с указанными значениями углов γ.

Принцип формирования серии импульсов двухполярной ШИМ показан на рис. 2.10, *б*. Реализация двухполярной ШИМ возможна в однофазной полумостовой схеме инвертора (рис. 2.10, *а*). Импульсы управления, подаваемые на базы силовых IGBT-транзисторов, формируются в результате сравнения модулирующего, низкочастотного напряжения (u_m) с опорным напряжением ($u_{оп}$) пилообразной формы, частота которого и является несущей частотой. Принцип управления заключается в том, что если мгновенное значение опорного напряжения больше, чем величина модулирующего напряжения, то включается транзистор *VT*2 и на нагрузке формируется импульс положительной полярности, как показано на рис. 2.10, *б*. Следовательно, если опорное напряжение становится меньше модулирующего напряжения, то транзистор *VT*2 выключается и включается транзистор *VT*1, что приводит к изменению полярности напряжения на нагрузке. При активно-индуктивном характере нагрузки, изменение полярности выходного напряжения происходит за счет включения обратного диода *VD*1, через который замыкается ток нагрузки, поддерживаемый за счет наличия ЭДС последовательной индуктивности контура нагрузки.

Принцип формирования серии импульсов однополярной ШИМ показан на рис. 2.11, *б*. Реализация однополярной ШИМ возможна в однофазной мостовой схеме инвертора (рис. 2.11, *а*). При этом одна пара силовых транзисторов, например, *VT*1 и *VT*4, переключается с частотой сигнала модуляции на границах полупериода выходного сигнала, а вторая пара транзисторов переключается с несущей частотой. Длительность управляющих импульсов формируется таким же образом, как и в предыдущем случае: в результате сравнения опорного напряжения и модулирующего сигнала.

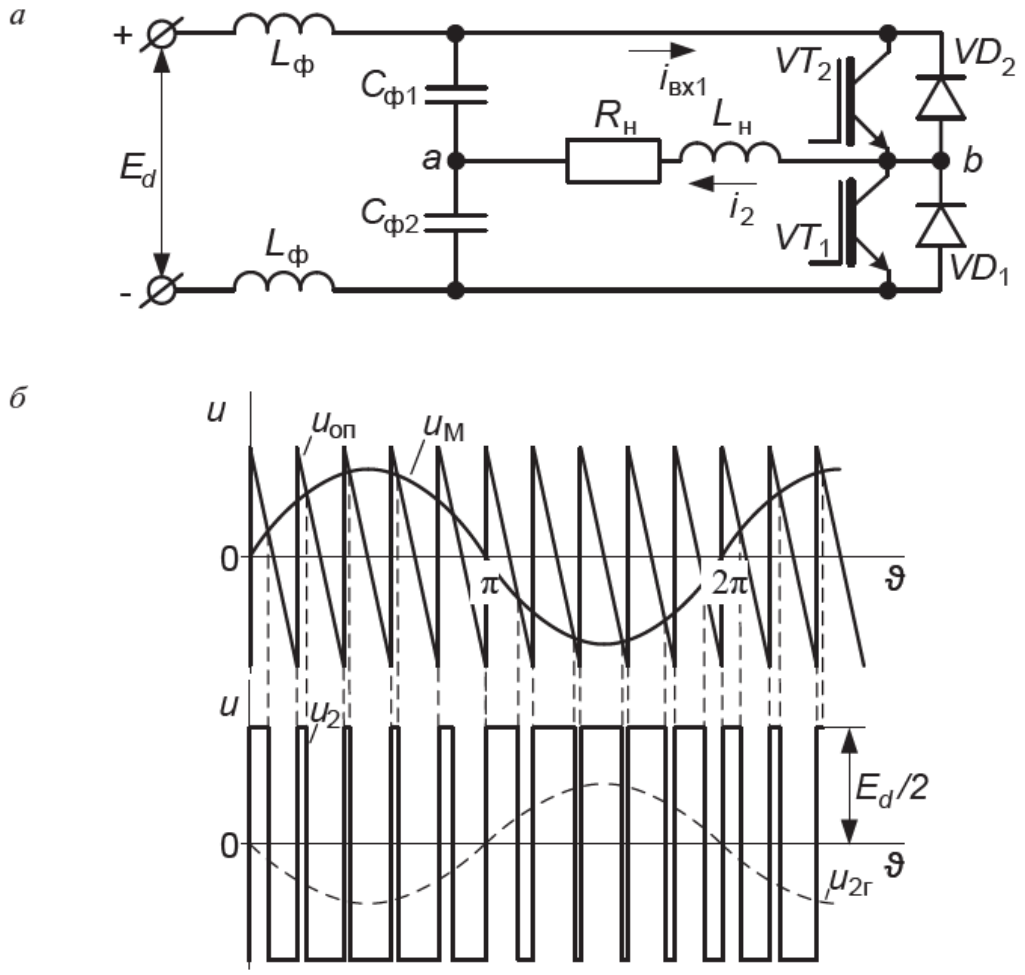


Рис. 2.10. Принцип формирования серии импульсов двухполярной ШИМ

Формирование импульса на выходе инвертора, например, положительной полярности, обеспечивается при одновременном включении транзисторов *VT*1 и *VT*2. Поскольку транзистор *VT*2 переключается с высокой частотой, то при его выключении транзистор *VT*1 остается включенным, что приводит к замыканию тока нагрузки, запасенного в индуктивности, через транзистор *VT*1 и диод *VD*3. При этом на выходе инвертора напряжение равно сумме падений напряжения на транзисторе и диоде, т. е. близко к нулю. Аналогично этому создается нулевой уровень сигнала и, при формировании отрицательной полуволны гладкой составляющей: при выключении транзистора *VT*3, — ток нагрузки замыкается через транзистор *VT*4 и диод *VD*2.

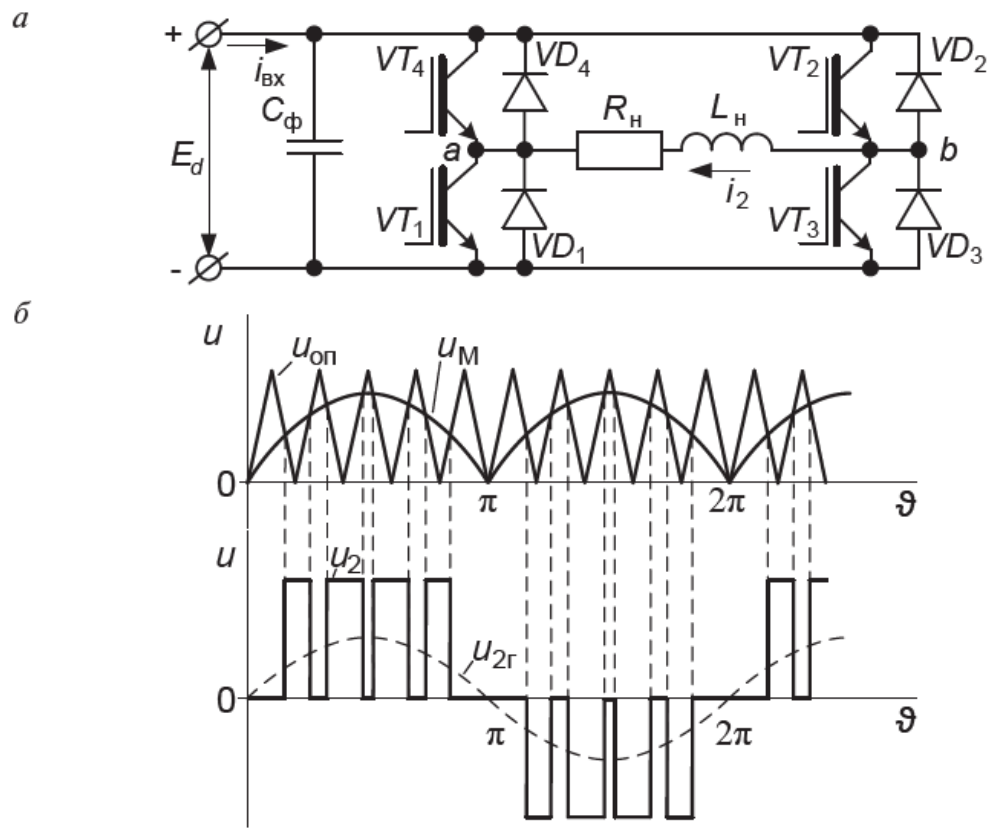


Рис. 2.11. Принцип формирования серии импульсов однополярной ШИМ

Таким образом, полярность гладкой составляющей выходного напряжения определяется путем включения транзисторов *VT*1 или *VT*4, а высокочастотное заполнение и форма гладкой составляющей — переключения транзисторов *VT*2 или *VT*3.

12.4.4. Выборочное исключение гармоник из кривой выходного напряжения АИН

Формирование выходного напряжения АИН с использованием ШИМ уводит спектр гармоник, отличных от основной, в область высоких частот. Чем выше несущая частота, тем больше частота гармоник, подлежащих фильтрации, и тем легче фильтры. Верхний предел значения несущей частоты ограничен частотными свойствами используемых приборов (диодов, транзисторов, тиристоров) и коммутационными потерями, уменьшающими КПД преобразователя с увеличением числа переключений вентилей на периоде. Проблему увеличения КПД и возможность реализации АИН с относительно высокими частотами основной гармоники (400 Гц и выше) можно решить, используя метод выборочного исключения гармоник. Кривая выходного напряжения строится таким образом, чтобы в ней отсутствовали гармоники, наиболее близкие к основной. Исключение даже двух близких к основной гармоник, скажем третьей и пятой, существенно облегчает выходные фильтры АИН.

Исключение определенных гармоник осуществляется одним из двух способов:

1) использованием дополнительных коммутаций на полупериоде выходного напряжения (рис. 12.27);

2) построением кривой выходного напряжения в виде набора ограниченного числа однополярных импульсов одинаковой длительности на полупериоде выходного напряжения (рис. 12.28).

Как видно на рис. 12.27, в кривой выходного напряжения однофазного инвертора (см. рис. 12.10) в районе нуля имеются вырезки при углах α_1 и α_2. Симметричная вырезка имеет место в районе π. На отрицательном полупериоде сделаны такие же вырезки. Если бы

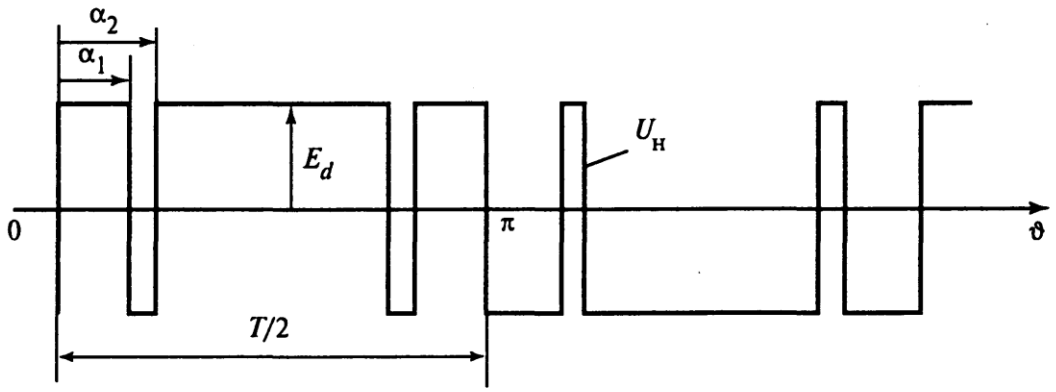


Рис. 12.27

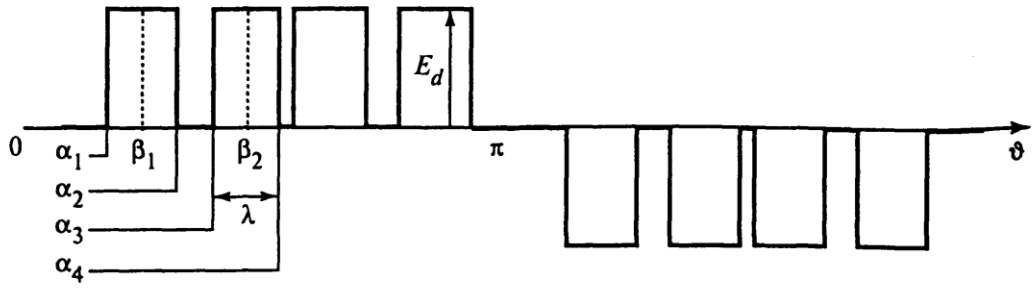


Рис. 12.28

вырезок не было, то кривая напряжения имела бы вид меандра. Такая кривая, как было показано в § 12.2, состоит из ряда нечетных гармоник, амплитуда которых подчиняется закону $1/n$, где n — номер гармоники. В общем случае может быть любое четное число дополнительных коммутаций на полупериоде выходного напряжения. Углы дополнительных коммутаций выбираются таким образом, чтобы исключить определенные гармоники.

Разложение кривой рис. 12.27 (четыре дополнительные коммутации на полупериоде кривой выходного напряжения) в ряд Фурье приводит к выражениям:

$$U_{\text{н}(n)\max} = \frac{4}{\pi}\int_0^{\alpha_1} E_d \sin(n\omega t)\,\mathrm{d}(\omega t) - \frac{4}{\pi}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} E_d \sin(n\omega t)\,\mathrm{d}(\omega t) +$$

$$+ \frac{4}{\pi}\int_{\alpha_2}^{90} E_d \sin(n\omega t)\,\mathrm{d}(\omega t) = \frac{4}{\pi}E_d\,\frac{1 - 2\cos n\alpha_1 + 2\cos n\alpha_2}{n}, \quad (12.17)$$

где $U_{\text{н}(n)\max}$ — амплитуда n-й гармоники напряжения на нагрузке.

Чтобы кривая рис. 12.27 не содержала наиболее весомые (после первой) третью и пятую гармоники, необходимо чтобы в полученном выражении числитель дроби был равен нулю для $n = 3$ и $n = 5$. Таким образом:

$$1 - 2\cos 3\alpha_1 + 2\cos 3\alpha_2 = 0;$$

$$1 - 2\cos 5\alpha_1 + 2\cos 5\alpha_2 = 0.$$

Решая эту систему уравнений, находим $\alpha_1 = 23{,}62°$, $\alpha_2 = 33{,}3°$.

Подобную систему уравнений можно составить для кривой с шестью дополнительными коммутациями на полупериоде. Тогда, чтобы исключить третью, пятую и седьмую гармоники необходимо иметь углы дополнительных коммутаций: $\alpha_1 = 14{,}1°$, $\alpha_2 = 36{,}95°$ и $\alpha_3 = 42{,}3°$.

ГЛАВА 5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Преобразователями частоты называют устройства, преобразующие электрическую энергию переменного тока одной частоты в электрическую энергию переменного тока другой частоты.

Преобразователи частоты подразделяются на две группы:

1. Со звеном постоянного тока.
2. Без звена постоянного тока или непосредственные преобразователи частоты.

5.1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ СО ЗВЕНОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Преобразователи частоты со звеном постоянного тока представляют собой совокупность выпрямителя и автономного инвертора (рис. 5.1). Поэтому преобразователям этого класса присущи все особенности выпрямителей и автономных инверторов, уже рассмотренных выше.

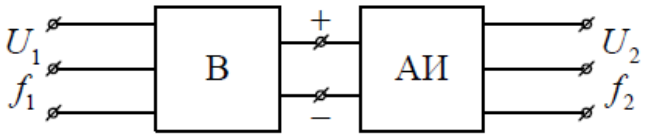


Рис. 5.1. Преобразователь частоты со звеном постоянного тока

5.2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ С НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ СВЯЗЬЮ

Преобразователи частоты с непосредственной связью осуществляют преобразование энергии непосредственно, без промежуточного выпрямления (рис. 5.2).

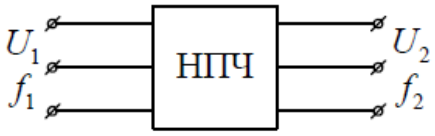


Рис. 5.2. Преобразователь частоты с непосредственной связью

Рассмотрим принцип действия этого класса преобразователей на примере схемы (рис. 5.3). Она представляет собой две взаимообратные

вентильные группы 1 и 2, питающиеся от сети (U_1, f_1). Нагрузка $Z_н$ включена между средними точками уравнительных дросселей L_1 и L_2.

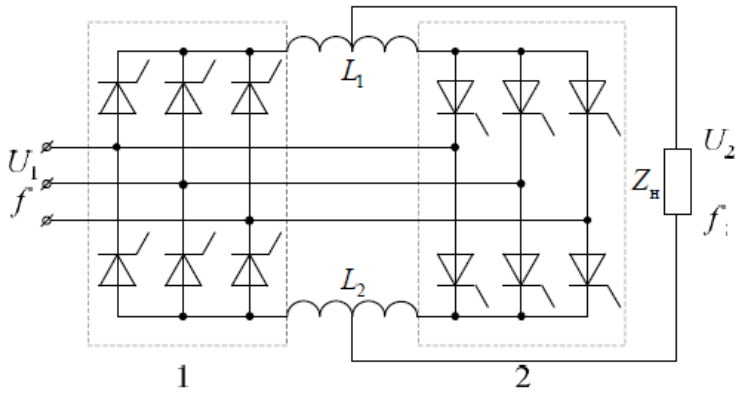


Рис. 5.3. Трехфазно-однофазный преобразователь частоты с непосредственной связью

Предположим, что в момент $\theta = 0$ (рис. 5.4) на вентили группы 1 начинают поступать импульсы управления с углом α. Вентильная группа 1 начинает работать как обыкновенный управляемый выпрямитель и на нагрузке будет напряжение $U_н$, среднее значение которого $U_{н\,ср} = 2{,}34U_1 \cos\alpha$.

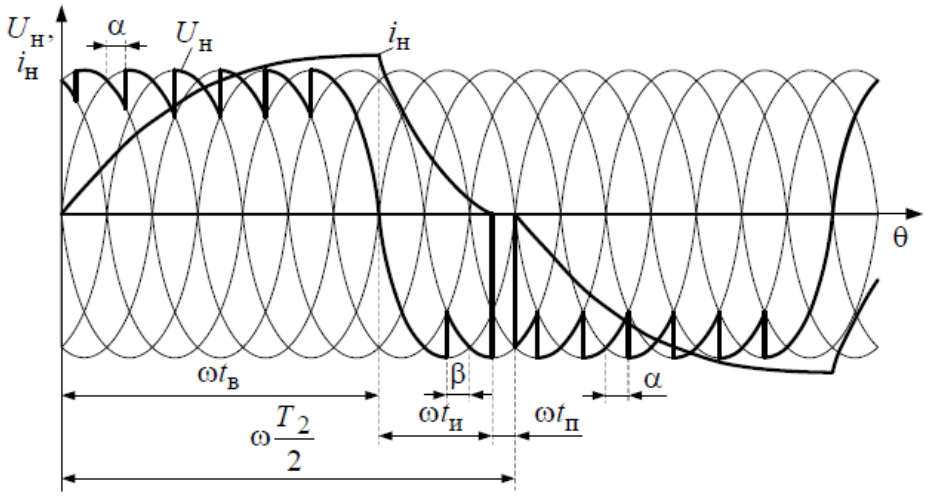


Рис. 5.4. Диаграмма, поясняющая работу трехфазно-однофазного преобразователя частоты с непосредственной связью

Такое положение будет сохраняться в течение интервала $\omega t_в$. За это время ток нагрузки $i_н$ в предположении активно-индуктивного ее характера, изменяясь по экспоненциальному закону, достигает $i_{н\,max}$.

В момент $\omega t_{в}$ прекращается подача на вентили группы 1 импульсов управления выпрямительным режимом, и она переводится в режим зависимого инвертора; при этом импульсы управления будут поступать с углом опережения β, а вентильная группа 1 будет формировать противоЭДС току нагрузки $i_{н}$, который вследствие этого начинает уменьшаться и через интервал $\omega t_{и}$ станет равным нулю. Последние, проводившие ток вентили группы 1, закрываются и в течение бестоковой паузы $\omega t_{п}$ восстанавливают свои управляющие свойства. После этого в точке $\omega\frac{T_2}{2}$ все описанные процессы повторяются, но со второй вентильной группой 2, вентили которой в течение всего рассматриваемого интервала $\omega\frac{T_2}{2}$ находились в закрытом состоянии.

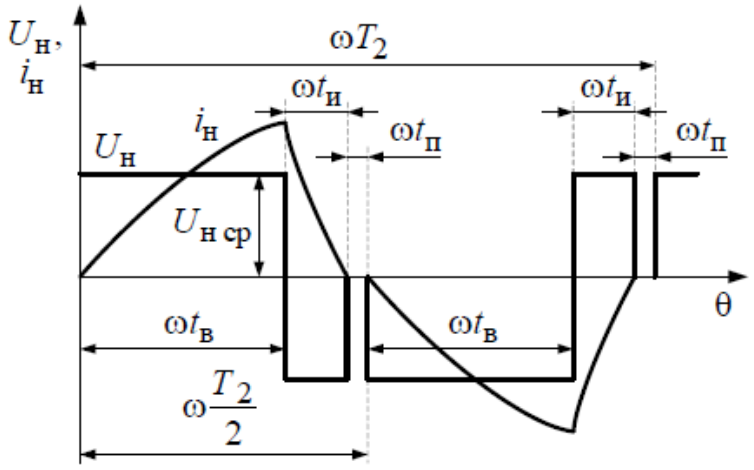


Рис. 5.5. Раздельное управление вентильными группами НПЧ

Таким образом, на нагрузке будет напряжение, близкое к прямоугольному (если пренебречь пульсациями на выходе вентильных групп), с амплитудой $U_{н\,ср} = 2{,}34U_1\cos\alpha$ в интервале $\omega t_{в}$ и $U'_{н\,ср} = -2{,}34U_1\cos\alpha$ в интервале $\omega t_{н}$ (рис. 5.5). При этом коммутация силовых вентилей в обеих вентильных группах происходит естественным путем – за счет переменного напряжения питающей сети. Поэтому такие преобразователи называются непосредственными преобразователями частоты с естественной коммутацией (НПЧ с ЕК).

Период изменения выходного напряжения $T_2 > T_1$ и, следовательно, частота на выходе преобразователя $f_2 < f_1$, что является принципиальной особенностью рассматриваемых схем. Второй принципиальной особенностью является свободный обмен энергией между питающей сетью и нагрузкой. Действительно, на участке $\omega t_{в}$ вентильная группа 1 работает как выпрямитель, и энергия направлена из питающей сети в нагрузку; на участке $\omega t_{и}$ группа 1 работает как зависимый инвертор и реактивная энергия, накопленная в нагрузке, направлена в питающую сеть.