

Лекция

ИНВЕРТОРЫ

План

1. Введение
2. Двухтактный инвертор
3. Мостовой инвертор
4. Способы формирования напряжения синусоидальной формы
5. Трехфазные инверторы
6. Выводы

1. Введение

Инверторы – устройства, предназначенные для преобразования постоянного тока в переменный с регулируемым напряжением и частотой. Эти устройства применяются в источниках бесперебойного питания, при индукционном нагреве, для регулирования скорости вращения электродвигателей переменного тока. В результате преобразования необходимо получить напряжение синусоидальной формы, амплитуду и частоту которого можно регулировать.

Работа инвертора основана на том, что ток в ветвях периодически прерывается с помощью вентилях. В качестве вентилях используют тиристоры, МОП-транзисторы, биполярные транзисторы с изолированным затвором.

Различают зависимые и независимые инверторы.

Зависимые инверторы (другое название – инверторы, ведомые сетью) требуют наличия внешних источников переменного напряжения. Такие инверторы используют в электроприводах.

Независимые (автономные) инверторы не требуют внешних источников. Переменное напряжение нужной частоты создается самим инвертором.

Технологии преобразования постоянного тока в переменный получили в последние годы значительное развитие. Современные инверторы обеспечивают получение синусоидального напряжения с малым коэффициентом гармоник, низкий уровень электромагнитных помех.

2. Двухтактный инвертор

Схема двухтактного инвертора показана на рис. 12.1. Первичная обмотка трансформатора разделена на две секции. Число витков секций

одинаково: $W_{11} = W_{12}$. Источник постоянного напряжения включен между центральным выводом первичной обмотки трансформатора и общей точкой ключей K_1 и K_2 . В качестве ключей используют тиристоры или МОП-транзисторы.

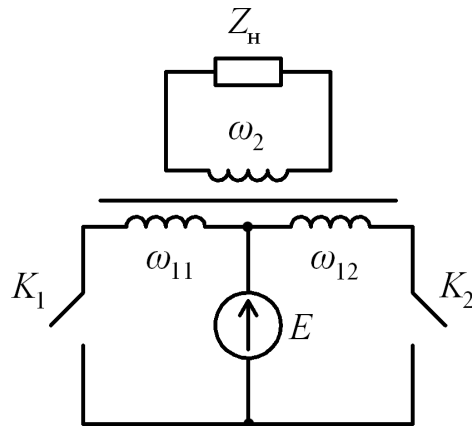


Рис. 12.1

Ключи K_1 и K_2 замыкаются поочередно. Каждый из ключей замкнут половину периода T . Предположим для определенности, что в первую половину периода на интервале $0 - T/2$ замкнут ключ K_1 , а K_2 разомкнут. Инвертор можно представить эквивалентной схемой, показанной на рис. 12.2. Направление тока на интервале $0 - T/2$ показано стрелкой.

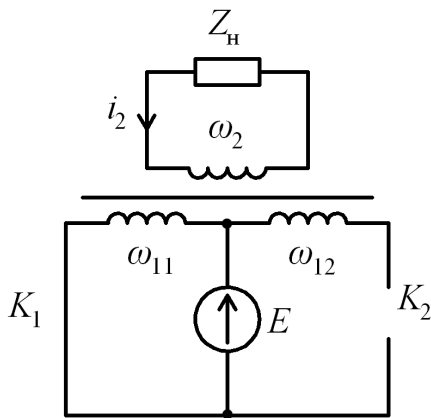


Рис. 12.2

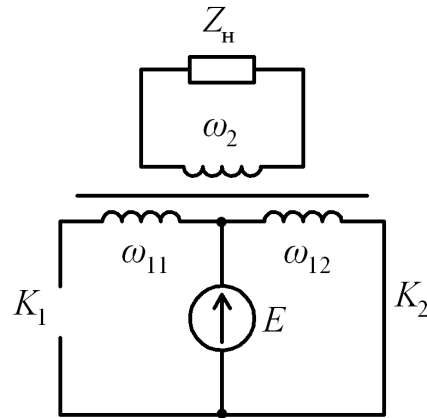


Рис. 12.3

Во вторую половину периода на интервале $T/2 - T$ замкнут ключ K_2 , а K_1 разомкнут. Этому состоянию ключей соответствует эквивалентная схема на рис. 12.3. Направление тока в нагрузке изменяется на противоположное. Таким образом, на сопротивлении нагрузки появится симметричное импульсное напряжение, частота которого $f = 1/T$. Форма тока во вторичной обмотке трансформатора зависит от характера нагрузки.

Для получения токов и напряжений, форма которых близка к синусоидальной, необходимы меры по снижению уровня высших гармоник. Как правило, эти меры заключаются в следующем.

1. Включение на выходе инвертора сглаживающего фильтра.
2. Усложнение алгоритма работы ключей для уменьшения коэффициента гармоник.
3. Коммутация промежуточных отводов первичной обмотки трансформатора.

Подробно мы рассмотрим эти меры позднее, когда изучим другие виды инверторов.

3. Мостовой инвертор

Схема мостового инвертора показана на рис. 12.4. В одну диагональ моста, образованного ключами K_1 — K_4 , включен источник постоянного напряжения, а в другую — нагрузка. Ключи переключаются так, что в одну половину периода замкнута одна диагональная пара ключей, а во вторую — другая пара ключей. Примем для определенности, что на интервале $0—T/2$ замкнуты ключи K_1 и K_4 , а на интервале $T/2—T$ замкнуты ключи K_2 и K_3 . Если нагрузка имеет резистивный характер, напряжение $u_n(t)$ будет иметь форму симметричных прямоугольных импульсов. Регулирование частоты переменного напряжения обеспечивается изменением частоты коммутации ключей.

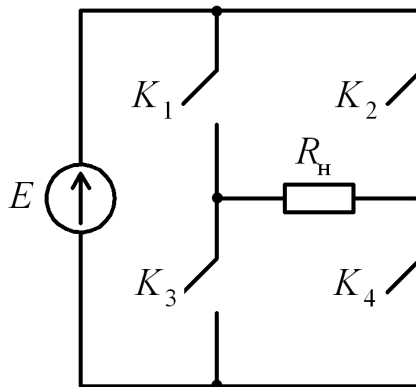


Рис. 12.4

Для получения напряжения, форма которого близка к синусоидальной, последовательно с нагрузкой включают сглаживающий LC-фильтр. (рис. 12.5).

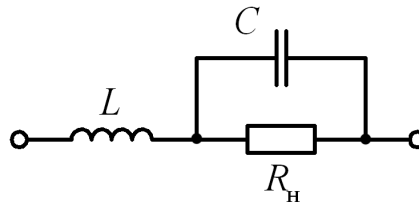


Рис. 12.5

Комплексная передаточная функция фильтра

$$H(j\omega) = \frac{1/LC}{-\omega^2 + j\omega \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC}}.$$

Амплитудно-частотная характеристика фильтра убывает, если частота сигнала превышает частоту среза $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Это обеспечивает подавление гармоник с порядковыми номерами $n = 2, 3, \dots$.

4. Способы формирования напряжения синусоидальной формы

Напряжение на выходе инвертора должно иметь форму, близкую к синусоидальной. В противном случае уменьшается коэффициент мощности устройства, возрастают электромагнитные помехи. Если инвертор используется в качестве источника питания асинхронного электродвигателя, наличие высших гармоник вносит дополнительные потери.

Если нагрузка мостового инвертора резистивная, выходное напряжение имеет форму прямоугольных импульсов (рис. 12.6). Разложение в ряд Фурье такого сигнала содержит только нечетные гармоники:

$$u_{\text{вых}}(t) = \frac{E_0}{4\pi} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega_1 t).$$

Амплитуда n -й гармоники

$$U_n = \frac{E_0}{4\pi} \frac{1}{n}.$$

Для уменьшения амплитуд гармоник с номерами $n = 3, 5, \dots$ на выходе инвертора включают LC -фильтр нижних частот (ФНЧ). Схема простейшего ФНЧ показана на рис. 12.5. Однако использование только сглаживающего фильтра оказывается недостаточно эффективным. Для подавления третьей и пятой гармоник, имеющих наибольшие амплитуды, необходим фильтр нижних частот (рис. 12.5) с частотой среза, близкой к частоте первой

гармоники. Для реализации такого фильтра требуются индуктивная катушка и конденсатор больших номиналов. Соответственно, такой фильтр имеет большие массу и габариты.

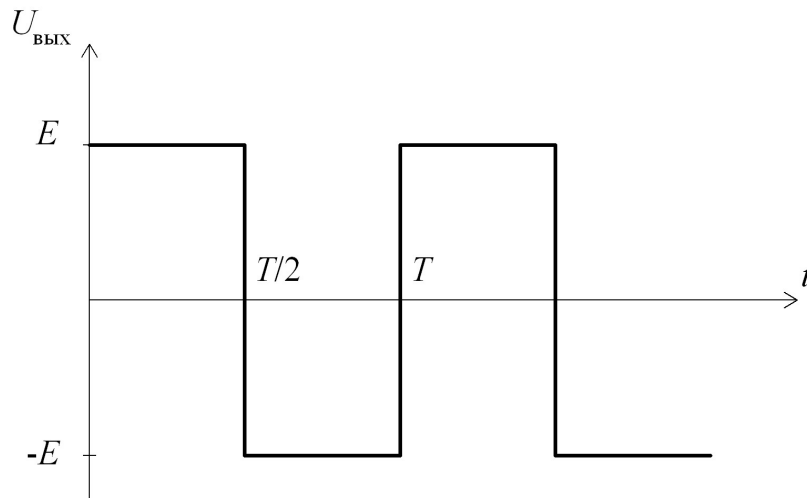


Рис. 12.6

Сглаживающий фильтр может иметь большую частоту среза, и, следовательно, меньшие габариты, если в спектре выходного напряжения гармоники низшего порядка ($n=3, 5$) отсутствуют. Напряжение с уменьшенным содержанием высших гармоник можно получить с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Однократная широтно-импульсная модуляция. При такой модуляции импульсное напряжение содержит только один импульс за половину периода (рис. 12.7). Такое напряжение мы получим, если ключи в схеме на рис. 12.4 замыкаются со смещением во времени. Диаграмма, показывающая интервалы замыкания ключей, изображена в нижней части рис. 12.7.

Покажем, что с помощью однократной ШИМ можно исключить из спектра одну из высших гармоник, изменяя угол включения δ .

Разложение в ряд Фурье последовательности импульсов на рис. 12.7 содержит только нечетные синусоиды:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = \sum_{n=1, 3, \dots}^{\infty} U_n \sin(n\omega t)$$

Амплитуда n -й гармоники

$$U_n = \frac{E_0}{4\pi n} \cos(n\delta).$$

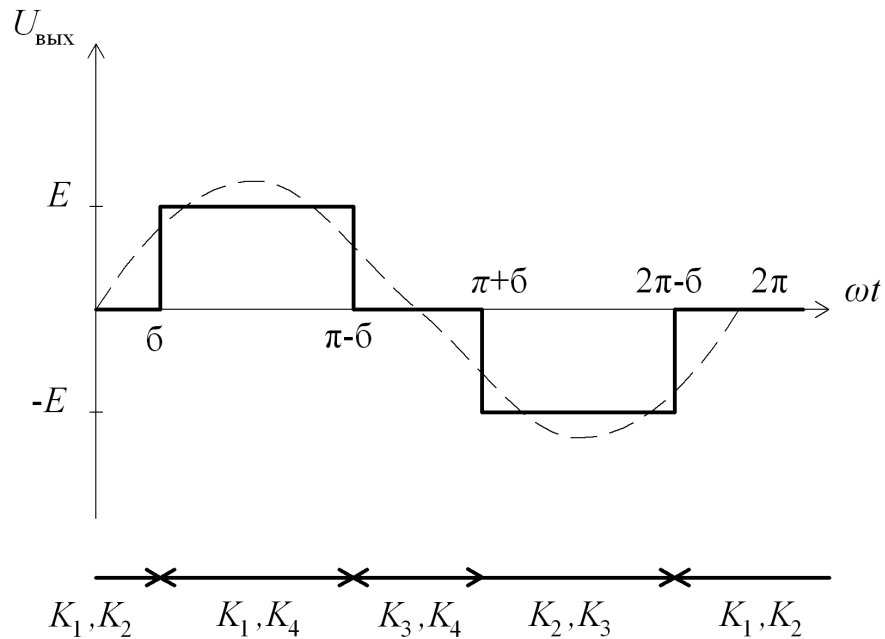


Рис. 12.7

Варьируя угол включения δ , мы изменяем амплитуды гармоник. Примем, что $\delta = 30^\circ$. Тогда амплитуда первой гармоники

$$U_1 = \frac{E_0}{4\pi} \cos(30^\circ) = \frac{E_0}{8\pi},$$

а амплитуда третьей гармоники равна нулю:

$$U_3 = \frac{E_0}{4\pi} \frac{1}{3} \cos(90^\circ) = 0.$$

Можно исключить пятую гармонику, полагая $\delta = 18^\circ$. Однако для одновременного исключения третьей и пятой гармоник необходимо сформировать импульсное напряжение более сложной формы.

Многokратная широтно-импульсная модуляция. В этом случае напряжение представляет серию импульсов за половину периода. На рис. 12.8 показано напряжение, имеющее два импульса одинаковой полярности на полупериоде. Напряжение такой формы позволяет исключить две высших гармоники. Однако это не могут быть одновременно третья и пятая гармоники.

Для исключения третьей и пятой гармоник необходимо напряжение, содержащее три импульса на полупериоде.

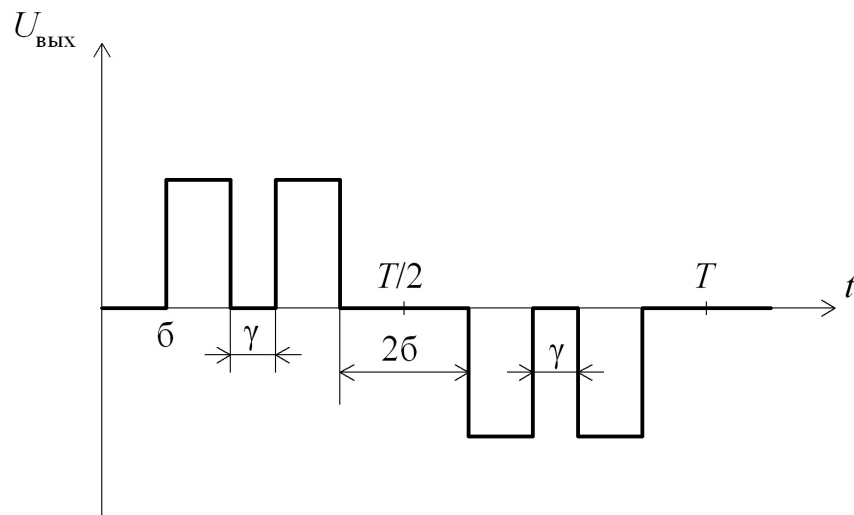


Рис. 12.8

Синусоидальная широтно-импульсная модуляция. Другой способ исключения высших гармоник из спектра заключается в модуляции длительности импульсов по синусоидальному закону. Такой способ эффективен при большом числе импульсов на полупериоде основной гармоники.

Форма сигналов широтно-импульсного модулятора показана на рис. 12.9. В течение полупериода цикла преобразования длительность центрального импульса максимальна, а длительность крайних импульсов уменьшается. Такой тип ШИМ называется асимметричным, т.к. длительности управляющих импульсов неодинаковы. Высшие гармонические составляющие в выходном напряжении такого инвертора будут меньше, чем при симметричной широтно-импульсной модуляции.

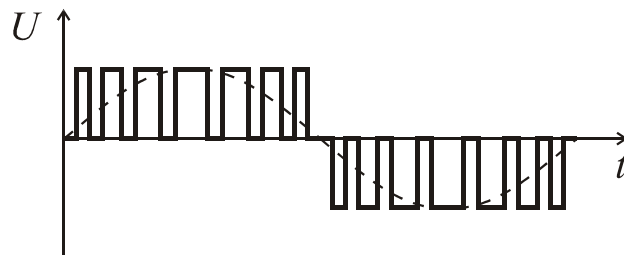


Рис. 12.9

Рассмотренные способы формирования выходного напряжения могут использоваться в мостовом инверторе на рис. 12.4.

5. Резонансные инверторы

Для регулирования формы и частоты выходного напряжения в инверторах, рассмотренных выше, используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Выходное напряжение в схемах с ШИМ имеет

пульсирующую форму. Недостаток инверторов с ШИМ заключается в том, что они имеют значительные коммутационные потери. Эти потери возникают из-за того, что в момент коммутации напряжение и ток ключа не равны нулю. Одним из способов уменьшения коммутационных потерь является проектирование схемы инвертора таким образом, чтобы коммутация ключей осуществлялась при нулевом токе («мягкое» выключение) или нулевом напряжении («мягкое» включение). Такие инверторы называют резонансными. По сравнению с ШИМ-преобразователями в резонансных схемах меньше коммутационные потери и ниже перегрузки силовых элементов. Для них не требуются ключи, способные выдерживать большие пиковые токи и импульсные напряжения.

Отметим основные преимущества резонансных инверторов перед инверторами с ШИМ.

1. Низкие коммутационные потери. Следствием этого является большой КПД.
2. Более высокие частоты коммутации ключей. Это ведет к уменьшению размеров магнитных элементов и всего инвертора.
3. Меньший уровень электромагнитных помех.

Простейшая схема резонансного инвертора показана на рис. 12.10. На входе включен источник постоянного напряжения. Резонансная LC -цепь включена между источником и нагрузкой. Регулирование выходного напряжения осуществляется с помощью ключа.

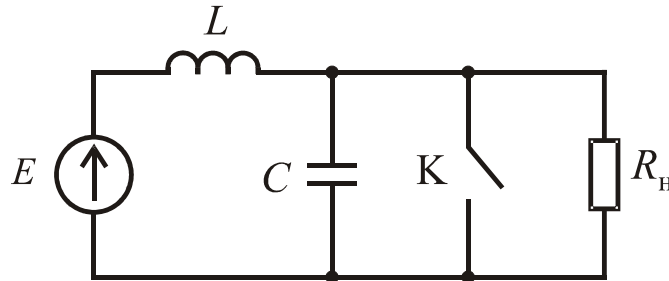


Рис. 12.10

Ключ замыкается и размыкается с фиксированной частотой. Когда ключ замкнут, ток в дросселе возрастает. После размыкания ключа напряжение конденсатора изменяется по синусоидальному закону. Процесс замыкания и размыкания ключа повторяется, а на конденсаторе появляется периодическое напряжение, форма которого близка к синусоидальной.

Индуктивность дросселя и емкость конденсатора выбирают такими, чтобы частота свободных колебаний LC -контура совпадала с частотой коммутации ключа. Подстройкой частоты коммутации добиваются нулевого напряжения в момент размыкания ключа.

Резонансные схемы нашли применение в мощных тиристорных электроприводах и системах бесперебойного питания. Однако в маломощных преобразователях они используются редко.

6. Трехфазные инверторы

Во многих случаях необходимы инверторы, генерирующие трехфазное синусоидальное напряжение. Такое напряжение требуется для трехфазных асинхронных двигателей с регулируемой скоростью вращения, различных электромеханических систем и т.д.

Простой трехфазный инвертор можно получить, объединив три однофазных инвертора. Для реализации такого инвертора необходимы 6 ключей. Получаемые фазные напряжения представляют прямоугольные импульсы, смещенные друг относительно друга на треть периода.

Трехфазное напряжение можно получить с помощью трех мостовых инверторов, показанных на рис. 12.4. При этом число ключей достигнет двенадцати.

Число ключей в инверторе, построенном на основе трех мостовых схем, можно уменьшить в два раза. Для этого необходимо, чтобы в определенный интервал, в течение которого ключ замкнут, был сдвинут на треть или половину периода по отношению к интервалу замыкания соседнего ключа.

Трехфазная мостовая схема инвертора показана на рис. 12.11. К инвертору подключена резистивная нагрузка. Такой инвертор может работать в двух режимах: 120-градусном и 180-градусном.

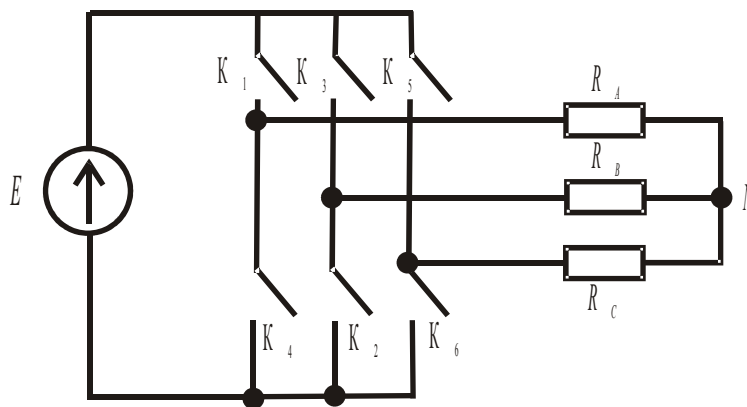


Рис. 12.11

При 120-градусном режиме каждый ключ находится в проводящем состоянии треть периода. В любой момент замкнуты два ключа, и ток замыкается через два из трех резисторов нагрузки. Замыкание ключей осуществляется в последовательности 61 – 12 – 23 – 34 – 45 – 56. Отметим, что в замкнутом состоянии находятся ключи, относящиеся к разным фазам. Поэтому такой режим называют режимом межфазной коммутации.

Временные диаграммы напряжений, соответствующие 120-градусному режиму, показаны на рис. 12.12.

Как следует из рис. 12.12, фазные напряжения представляют последовательность прямоугольных импульсов, сдвинутых на треть периода, а линейные напряжения имеют шестиступенчатую форму.

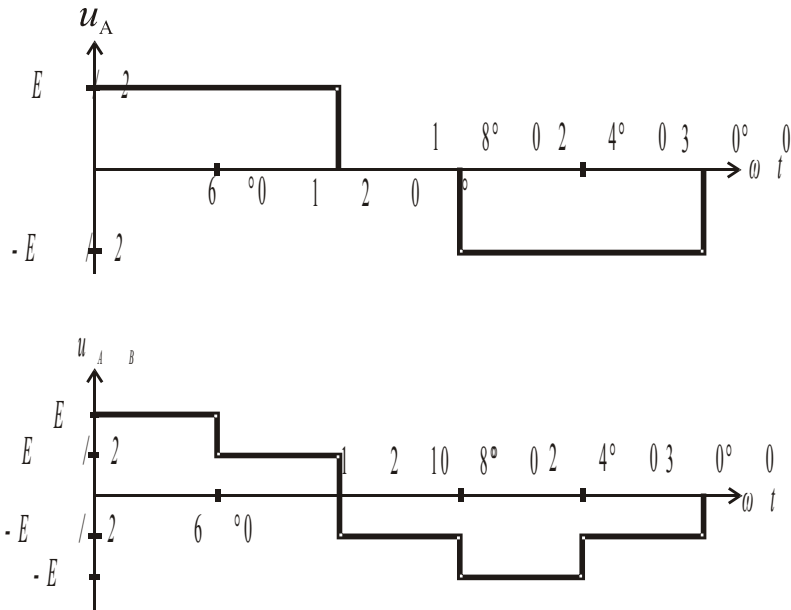


Рис. 12.12

При 180-градусном режиме работы каждый ключ замкнут половину периода, в этом режиме одновременно замкнуты три ключа – два нечетных ключа и один четный либо два четных ключа и один нечетный. Замыкание ключей осуществляется в последовательности 561 – 612 – 123 – 234 – 345 – 456. Поскольку одновременно замкнуты ключи во всех трех фазах, такой режим называют режимом пофазной коммутации.

В каждый момент времени два резистора нагрузки подключены к источнику параллельно, а третий – последовательно с ними. Поэтому напряжение на параллельных резисторах равно $E/3$, а на последовательном – $2E/3$.

Временные диаграммы напряжений трехфазной мостовой схемы при пофазной коммутации показаны на рис. 12.13.

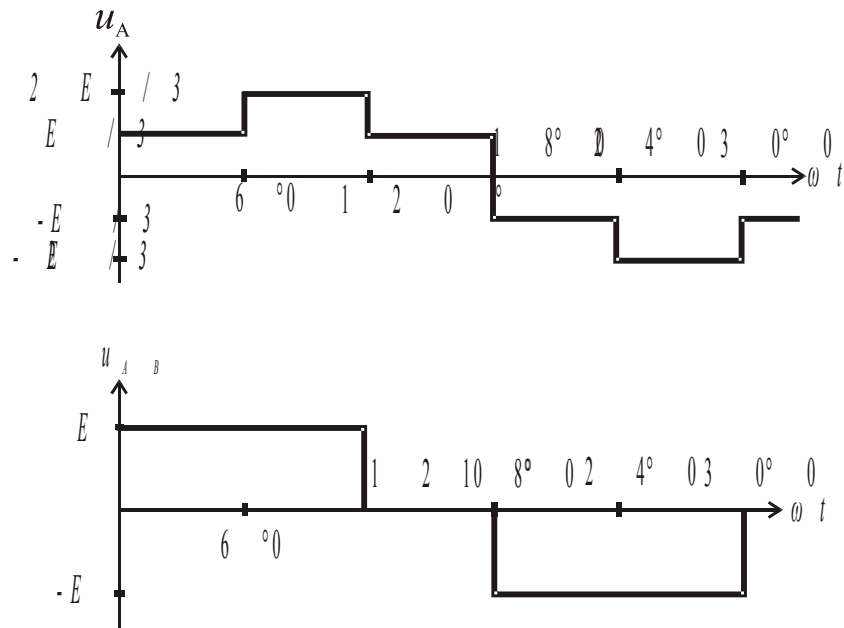


Рис. 12.13

Линейные напряжения на выходе инвертора представляют последовательность прямоугольных импульсов, сдвинутых на треть периода, а фазные напряжения имеют шестиступенчатую форму.

5. Выводы

1. Инверторы – устройства, предназначенные для преобразования постоянного тока в переменный с регулируемым напряжением и частотой.
2. Работа инвертора основана на том, что ток в ветвях периодически прерывается с помощью вентилях. В качестве вентилях используют тиристоры, МОП-транзисторы, биполярные транзисторы с изолированным затвором.
3. Зависимые инверторы (инверторы, ведомые сетью) требуют наличия внешних источников переменного напряжения.
4. Независимые (автономные) инверторы не требуют внешних источников. Переменное напряжение нужной частоты создается самим инвертором.
5. Наибольшее влияние на форму выходного напряжения оказывают гармоники с номерами $n=3, 5$. Напряжение с уменьшенным содержанием высших гармоник можно получить с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ).
6. Выходное напряжение инвертора с ШИМ имеет полуволновую симметрию, поэтому четные гармоники в спектре напряжения отсутствуют.

7. Нечетные гармоники с номерами $n=3, 5$ можно существенно уменьшить или устранить с помощью многократной ШИМ.