

конденсатор, подключенный параллельно нагрузке, либо к свойствам последовательного резонансного инвертора, если превалирует последовательно включённый конденсатор.

Существует большое количество схемных вариантов резонансных инверторов, каждый из которых имеет свои отличительные особенности, достоинства и недостатки, но есть одно свойство резонансных инверторов, обеспечивающее им широкие перспективы применения в различных областях техники. Речь идет о возможности построения на базе резонансных инверторов так называемых «многоячейковых инверторов». Многоячейковые резонансные инверторы применяют, например, тогда, когда необходимо получить выходную частоту, превышающую предельное значение выходной частоты одного инвертора, либо когда нужно получить большую выходную мощность без последовательного или параллельного соединения силовых вентилях. Это достигается благодаря тому, что n отдельных резонансных инверторов работают на одну и ту же нагрузку либо со сдвигом по фазе на угол $\frac{2\pi}{n}$, и тогда частота

выходного напряжения на нагрузке будет в n раз превышать выходную частоту отдельного инвертора, либо их можно включать или параллельно, или последовательно для получения большой мощности в нагрузке.

Описание свойства резонансных инверторов позволяют отметить и наиболее перспективные области применения. В первую очередь это высокочастотные установки индукционного нагрева металлов, широко применяемые в различных технологических процессах.

Это и высокочастотные звенья преобразования энергии в мощных устройствах электропитания различного назначения.

Это и источники питания мощных светотехнических установок.

Особенно большие перспективы применения резонансных инверторов открываются в связи с появлением новых мощных силовых ключей на базе полевых транзисторов, а также комбинированных транзисторов – *IGBT*, которые существенно превышают по целому ряду важнейших показателей силовые тиристоры.

4.2.2. Инверторы напряжения

Инверторы напряжения могут строиться как на полностью управляемых вентилях, так и на тиристорах, если их снабдить узлами коммутации, позволяющими выключать тиристоры в любой момент времени.

Рассмотрим однофазный мостовой инвертор напряжения, выполненный на транзисторах (рис. 4.34).

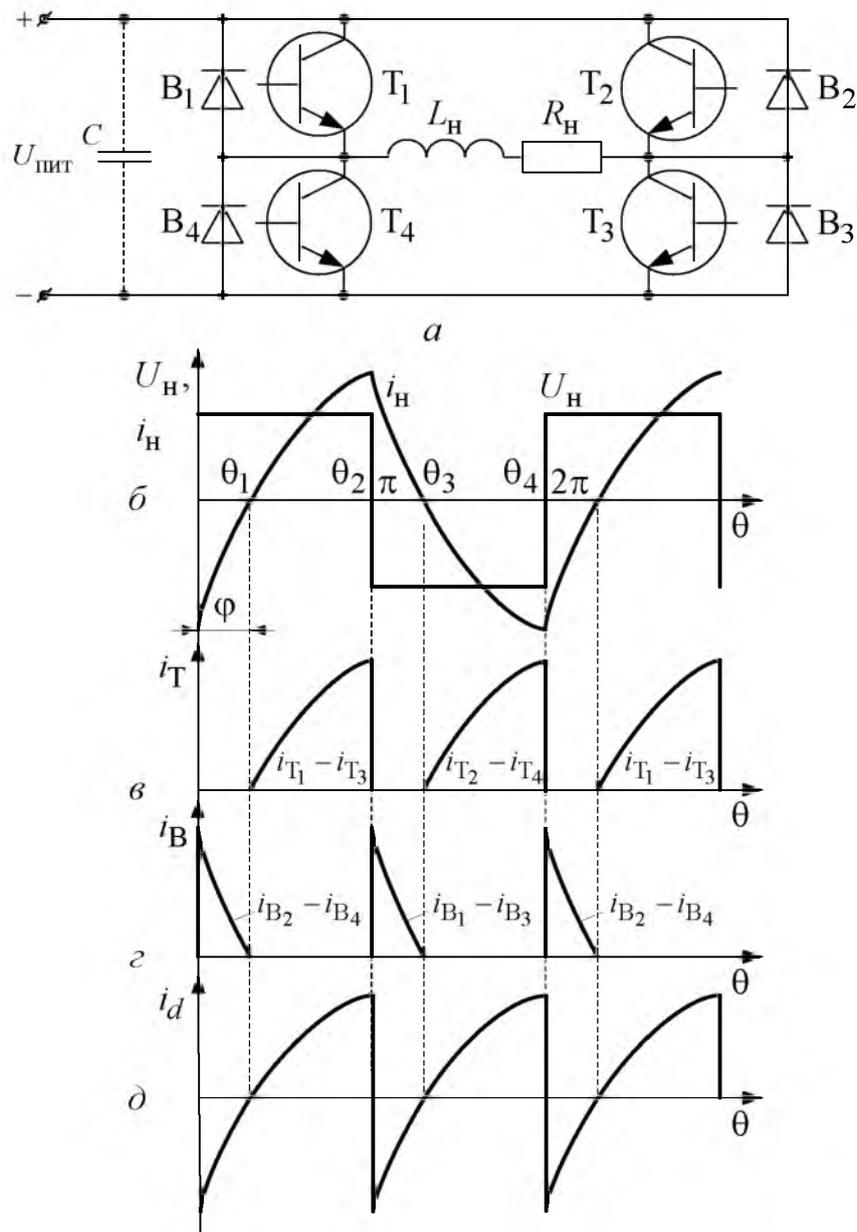


Рис. 4.34. Однофазный инвертор напряжения

Здесь на участке $\theta_1 \dots \theta_2$, открыты транзисторы $T_1 - T_3$ и ток протекает от источника питания в нагрузку. В точке θ_2 транзисторы $T_1 - T_3$ выключаются, а включаются транзисторы $T_2 - T_4$, и реактивная энергия, накопленная в магнитном поле L_H , сбрасывается в источник питания через диоды $B_2 - B_4$ на интервале $\theta_2 \dots \theta_3$. И только в точке θ_3 потечет ток от источника питания в нагрузку в противоположном направлении. Составим дифференциальное уравнение для интервала

$\theta_1 \dots \theta_3$, в предположении идеальности силовых элементов схемы и источника питания:

$$X_H \frac{di_H}{d\theta} + i_H R_H = \pm U_{\text{пит}}, \quad (4.34)$$

где $+U_{\text{пит}}$ соответствует интервалу $\theta_1 \dots \theta_2$, а $-U_{\text{пит}}$ – интервалу $\theta_2 \dots \theta_3$. Решая это уравнение относительно тока i_H , с учетом, что $-i_H \Big|_{\theta=0} = +i_H \Big|_{\theta=\pi}$, получим:

$$i_H = \pm \frac{U_{\text{пит}}}{R_H} \left(1 - \frac{2e^{\frac{-\theta R_H}{X_H}}}{1 + e^{\frac{-\pi R_H}{X_H}}} \right). \quad (4.36)$$

Максимальное значение тока силовых вентилях $i_{H \text{ max}} = i_H \Big|_{\theta=0}$:

$$i_{H \text{ max}} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_H} \left(1 - \frac{2}{1 + e^{\frac{-\pi R_H}{X_H}}} \right).$$

Из условия $i_H \Big|_{\theta=\varphi} = 0$ находим φ – момент перехода тока i_H через нуль:

$$\varphi = \ln \left(\frac{2}{1 + e^{\frac{-\pi R_H}{X_H}}} \right) \frac{X_H}{R_H}. \quad (4.37)$$

Среднее значение тока для основных вентилях инвертора

$$I_T = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi_H}^{\pi} i_H d\theta = \frac{U_{\text{пит}} (\pi - \varphi)}{2\pi R_H} + \frac{U_{\text{пит}} X_H \left(e^{\frac{\pi R_H}{X_H}} - e^{\frac{\varphi R_H}{X_H}} \right)}{\pi R_H^2 \left(1 + e^{\frac{\varphi R_H}{X_H}} \right)}, \quad (4.38)$$

для обратных диодов

$$I_B = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\varphi_H} i_H d\theta = \frac{U_{\text{пит}} \varphi_H}{2\pi R_H} + \frac{U_{\text{пит}} X_H \left(e^{\frac{-\varphi R_H}{X_H}} - 1 \right)}{\pi R_H^2 \left(1 + e^{\frac{-\pi R_H}{X_H}} \right)}. \quad (4.39)$$

Среднее значение тока источника питания

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_H d\theta = 2(I_T + I_B) = \frac{U_{\text{пит}}}{R_H} \left[1 + \frac{2 \left(e^{\frac{\pi R_H}{X_H}} - 1 \right)}{\frac{R_H}{X_H} \pi \left(1 + e^{\frac{\pi R_H}{X_H}} \right)} \right]. \quad (4.40)$$

Активная мощность нагрузки равна мощности, потребляемой от источника питания:

$$P_H = U_{\text{пит}} I_d = \frac{U_{\text{пит}}^2}{R_H} \left[1 + \frac{2 X_H \left(e^{\frac{\pi R_H}{X_H}} - 1 \right)}{R_H \pi \left(1 + e^{\frac{\pi R_H}{X_H}} \right)} \right]. \quad (4.41)$$

Полная мощность нагрузки определяется как $S_H = U_H I_H$, где I_H – действующее значение тока нагрузки:

$$I_H = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_H^2 d\theta} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_H} \sqrt{1 + \frac{2 X_H \left(e^{\frac{-\pi R_H}{X_H}} - 1 \right)}{\pi R_H \left(e^{\frac{-\pi R_H}{X_H}} + 1 \right)}}. \quad (4.42)$$

Так как $U_H = U_{\text{пит}}$, то

$$S_H = \frac{U_{\text{пит}}^2}{R_H} \sqrt{1 + \frac{2 X_H \left(e^{\frac{-\pi R_H}{X_H}} - 1 \right)}{\pi R_H \left(e^{\frac{-\pi R_H}{X_H}} + 1 \right)}}. \quad (4.43)$$

Полный коэффициент мощности

$$\chi = \frac{P_H}{S_H} = \sqrt{1 + \frac{2 X_H \left(e^{\frac{\pi R_H}{X_H}} - 1 \right)}{R_H \pi \left(1 + e^{\frac{\pi R_H}{X_H}} \right)}}. \quad (4.44)$$

Из принципа работы инвертора напряжения следует, что выходное напряжение его не зависит от нагрузки и, следовательно, внешняя характеристика имеет жесткий характер.

В случае односторонней проводимости источника питания (например, выпрямитель) параллельно ему необходимо устанавливать

конденсатор C для приема возвращаемой через обратные вентили реактивной энергии нагрузки.

Инверторы напряжения, выполненные на тиристорах, в отличие от инверторов тока не могут использовать для коммутации емкостной характер нагрузки, так как емкостная нагрузка недопустима в инверторах напряжения из-за больших бросков тока в момент коммутации. Поэтому в тиристорных инверторах напряжения применяются специальные коммутационные узлы, которые могут реализовать различные способы коммутации (см. п. 4.2). Может здесь применяться и способ конденсаторной коммутации, рассмотренный в инверторах тока, но коммутирующие конденсаторы должны быть отделены от нагрузки отсекающими диодами, чтобы не оказывать влияние на результирующий характер нагрузки, а входная индуктивность должна иметь такую величину, чтобы образовывать с коммутирующим конденсатором C колебательный контур, обеспечивающий выключение силовых тиристоров в заданный момент времени, а также исключить короткое замыкание источника питания в момент коммутации, когда одновременно открыты все четыре тиристора.

Таким образом, однофазные тиристорные инверторы напряжения в схемном отношении будут подобны схемам на рис. 4.22, 4.24.

При большой индуктивности цепи нагрузки неизбежно возникнут перенапряжения на силовых элементах схемы при коммутации вентилей из-за ЭДС самоиндукции. Для устранения этого явления в схему вводятся обратные вентили $B'_1 - B'_4$, которые создают цепь для сброса реактивной энергии нагрузки в источник питания (рис. 4.35, 4.36).

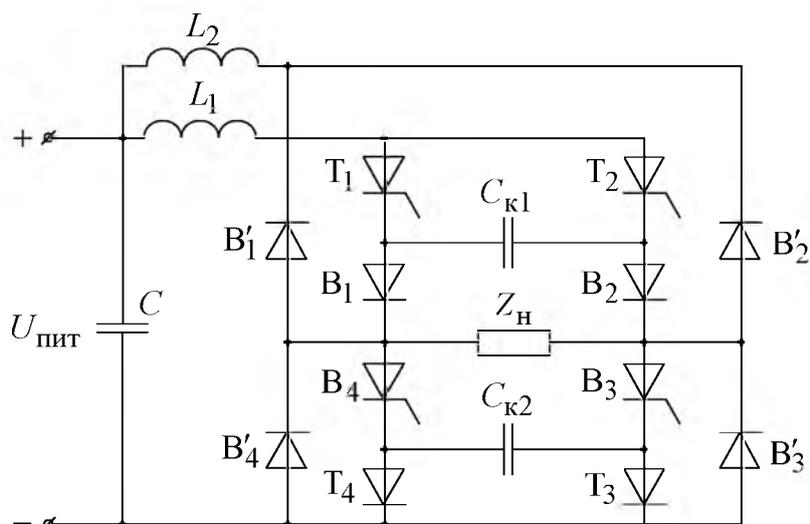


Рис. 4.35. Однофазный мостовой инвертор напряжения с отсекающими вентилями

Для сглаживания тока в этой цепи может устанавливаться еще один дроссель L_2 , а в случае односторонней проводимости источника предусматривается еще конденсатор C на входе инвертора.

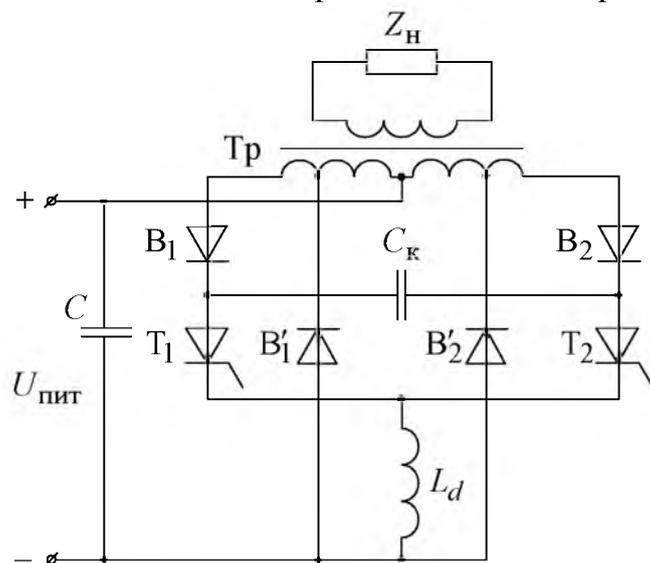


Рис. 4.36. Однофазный инвертор напряжения со средней точкой и с отсекающими вентилями

Аналогичным образом может быть построен и трехфазный тиристорный инвертор (рис. 4.37) напряжения.

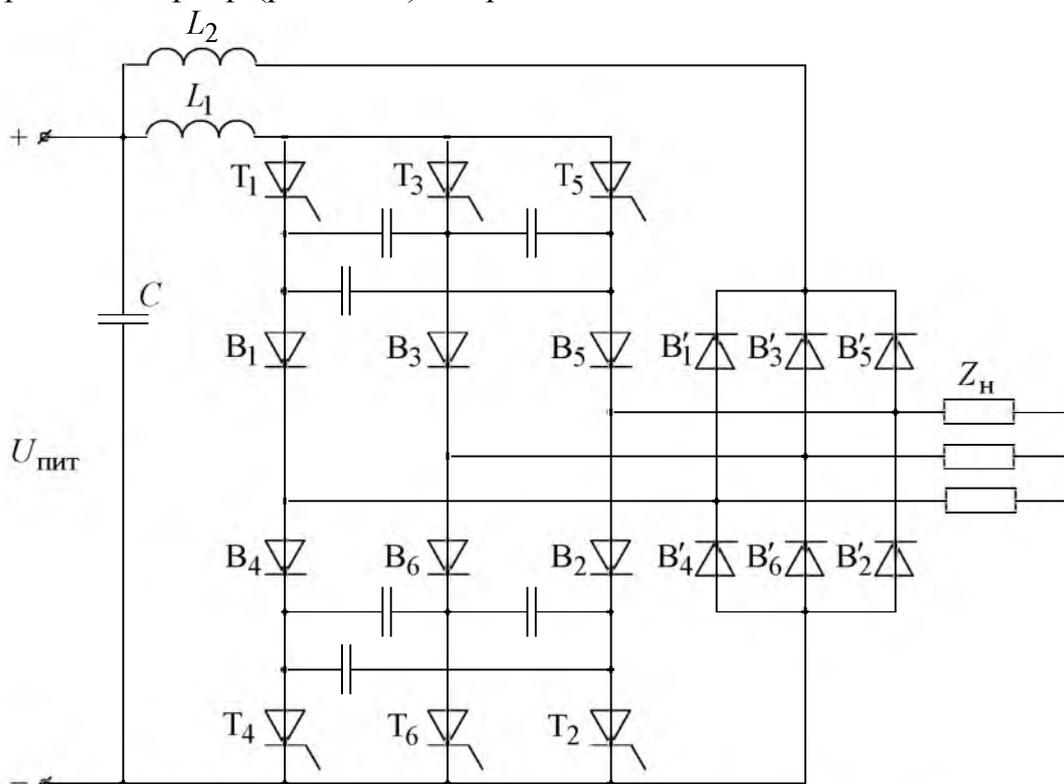


Рис. 4.37. Трехфазный мостовой инвертор напряжения с отсекающими вентилями

В этой схеме одновременно в любой момент времени проводят ток два вентиля – один в анодной, другой в катодной группе. Порядок включения вентилях – $V_1 - V_2$; $V_2 - V_3$; $V_3 - V_4$; $V_4 - V_5$; $V_5 - V_6$. Интервал проводимости каждой пары вентилях составляет $\frac{\pi}{3}$, а интервал проводимости каждого вентиля – $\frac{2\pi}{3}$. Существуют трехфазные инверторы, у которых интервал проводимости вентилях составляет π . В этом случае в схеме моста одновременно открыты три вентиля и порядок их включения следующий: $V_1 - V_2 - V_3$; $V_2 - V_3 - V_4$; $V_3 - V_4 - V_5$; $V_4 - V_5 - V_6$; $V_5 - V_6 - V_1$; ... Для реализации такого алгоритма включения необходимы либо полностью управляемые вентиля, либо специальные коммутирующие узлы, отличные от рис. 4.37. В инверторах со 180-градусным интервалом проводимости, в отличие от 120-градусного, форма кривой выходного напряжения не зависит от параметров нагрузки, а также обеспечивается лучшее использование вентилях по току.

4.3. ДВУХСТУПЕНЧАТАЯ КОММУТАЦИЯ В СХЕМАХ ИНВЕРТОРОВ

Характерной особенностью всех рассмотренных выше автономных инверторов является то, что для выключения рабочего вентиля необходимо включить очередной вентиль и таким образом ток нагрузки в процессе коммутации переходит с одного рабочего вентиля на другой. Этот способ коммутации получил название одноступенчатого. Существуют схемы инверторов, где выключение рабочего вентиля не связано с включением очередного вентиля, а осуществляется при помощи специального коммутирующего вентиля, вводящего в действие одну из схем принудительной коммутации (рис. 4.11–4.16).

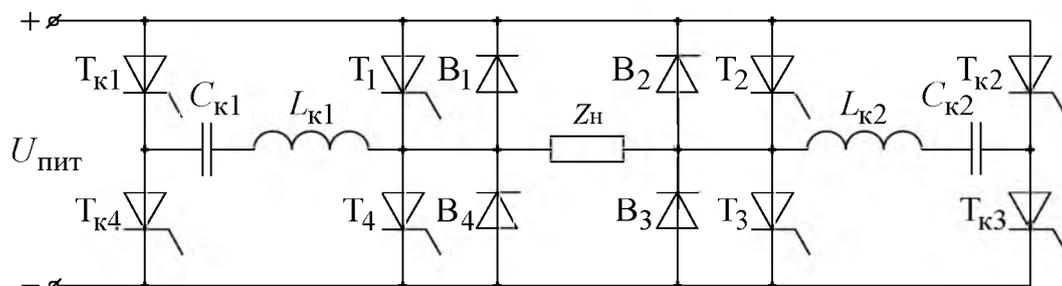


Рис. 4.38. Инвертор напряжения с двухступенчатой коммутацией

При активно-индуктивной нагрузке инвертора рабочий ток после выключения силового вентиля переходит на вентиль обратного тока, а уже затем на очередной вентиль, т. е. коммутационный процесс проходит в две ступени (двухступенчатая коммутация). Коммутационный узел может быть предусмотрен на каждый силовой вентиль инвертора (повентильная коммутация), на два вентиля, работающих в одной фазе (пофазная коммутация), на группу тиристор-ов в мостовой схеме (групповая коммутация) и весь инвертор (общая коммутация).

В качестве примера рассмотрим однофазный мостовой инвертор напряжения с пофазной двухступенчатой коммутацией (рис. 4.38). Здесь для запираения рабочих тиристор-ов $T_1 - T_4$ служат два колебательных контура $L_k C_k$, управляемые коммутирующими тиристор-ами $T_{1k} - T_{4k}$. Предположим, что от предыдущей коммутации на конденсаторах C_k остался заряд, полярность которого указана без скобок, а ток проводят тиристор-ы T_1 и T_3 . В нужный момент времени для запираения тиристор-ов T_1 и T_3 открываются тиристор-ы T_{1k} и T_{3k} и начинается колебательный перезаряд конденсатор-ов C_k по цепям $L_{k1} - T_1 - T_{1k}$ и $L_{2k} - T_3 - T_{3k}$, в результате чего тиристор-ы T_1 и T_3 закрываются, когда ток колебательного контура достигает тока нагрузки, а затем процесс перезарядки будет продолжаться уже по цепи вентиля-ей V_1 и V_3 вместо закрывающихся тиристор-ов T_1 и T_3 , которые в это время восстанавливают управляющие свойства, т. к. к ним приложены в запирающем направлении прямые падения напряжения на вентилях V_1 и V_3 . В результате перезаряда полярность напряжения на конденсаторах C_{k1} и C_{k2} изменяется на противоположную, а тиристор-ы T_1 и T_3 закрываются. И когда откроются тиристор-ы T_2 и T_4 , то для их запираения достаточно открыть коммутирующие тиристор-ы T_{2k} и T_{4k} , в результате чего конденсатор-ы C_{k1} и C_{k2} перезарядятся до исходной полярности.

Таким образом, включение тиристор-ов T_1 и T_3 не связано с включением тиристор-ов T_2 и T_4 и выходное напряжение инвертора может иметь вид, представленный на рис. 4.39.

Это позволяет осуществить в инверторах с двухступенчатой коммутацией методы широтно-импульсного регулирования (ШИР), когда выходное напряжение инвертора формируется в виде импульсов одинаковой длительности, а регулирование напряжения осуществляется

изменением соотношения длительности импульсов $t_{И}$ длительности паузы $t_{П}$.

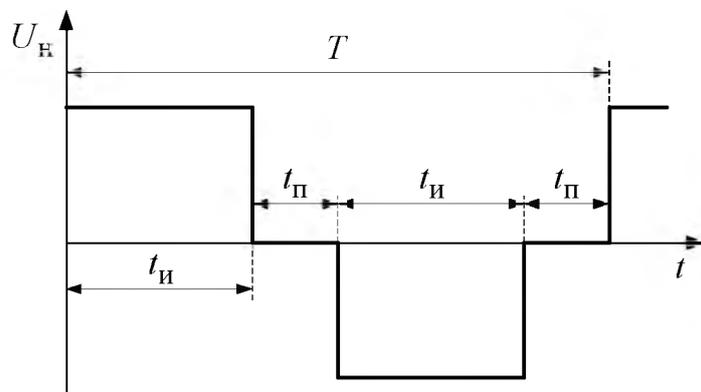


Рис. 4.39. Выходное напряжение инвертора с двухступенчатой коммутацией

Еще одним важным достоинством двухступенчатой коммутации является возможность широтно-импульсной модуляции (ШИМ), когда выходное напряжение формируется в виде импульсов переменной за период длительности, модулируемых по заданному закону (синусоидальному, трапецеидальному и т. д.), что позволяет снизить содержание высших гармоник. По способам формирования сигналов с ШИМ различают пять родов, из которых в силовой преобразовательной технике применяется только два: ШИМ первого рода и ШИМ второго рода. Рассмотрим принцип формирования сигналов с ШИМ первого рода.

Предположим, что нужно модулировать прямоугольные импульсы по какому-либо закону, например, синусоидальному (рис. 4.40, а). Для этого формируются опорные, тактовые импульсы

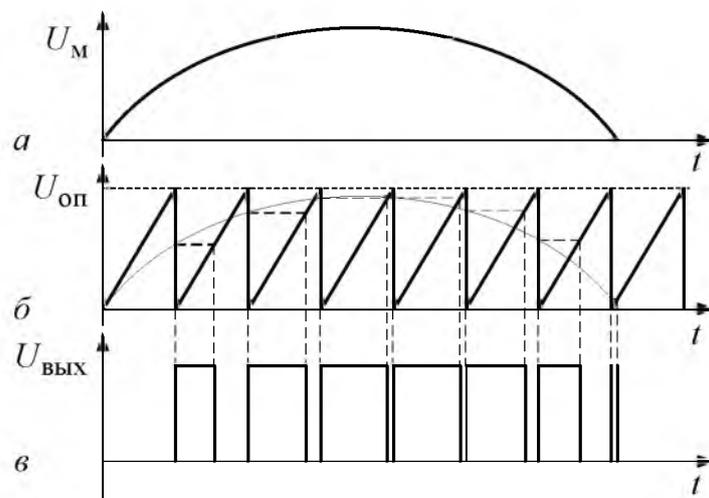


Рис. 4.40. Широтно-импульсная модуляция первого рода

пилообразной (треугольной) формы, строго синхронизированные с модулируемыми импульсами (рис. 4.40, б), на которые накладывается модулирующий сигнал.

Длительность модулированных импульсов определяется временем, необходимым для нарастания тактового, опорного треугольного сигнала $U_{оп}$ до величины, которую имел модулирующий сигнал в тактовый момент времени (в момент начала формирования треугольного сигнала).

Принцип формирования сигнала с ШИМ второго рода поясняется на рис. 4.41. Так же, как и в предыдущем случае, формируются тактовые, опорные импульсы треугольной формы, синхронизированные с модулируемыми импульсами, на которые накладывается модулирующий сигнал U_M .

Длительность модулированных импульсов определяется точками пересечения модулирующего сигнала с треугольным опорным напряжением (рис. 4.41, б) и равна времени, необходимому для нарастания треугольного сигнала до величины модулирующего напряжения.

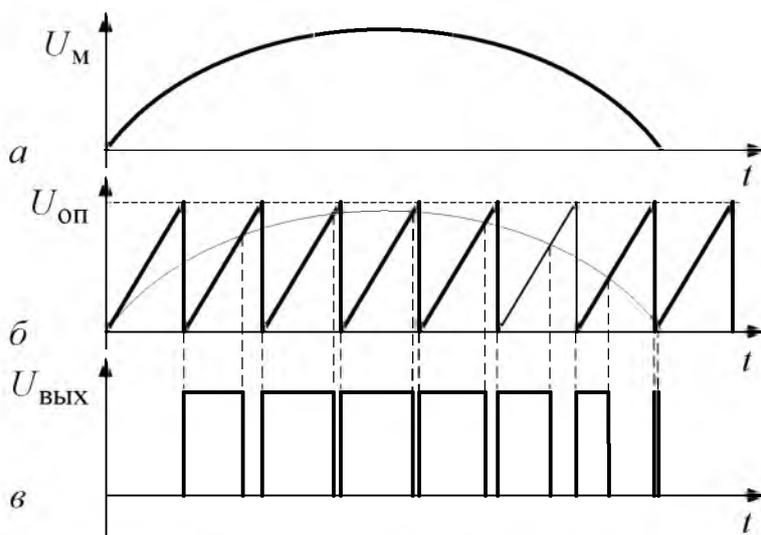


Рис. 4.41. Широтно-импульсная модуляция второго рода

При оценке несинусоидальности кривых выходного напряжения инверторов обычно используют коэффициент гармоник

$$k_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{k \rightarrow \infty} U_k^2}}{U_1}, \quad (4.45)$$

где U_k – действующее значение высшей гармоники с порядковым номером k . Обычно для большинства элементов электрооборудования требование к коэффициенту гармоник устанавливается на уровне не более 5 %.

Для улучшения кривой выходного напряжения, кроме методов ШИМ, используются методы амплитудно-импульсной модуляции (АИМ), а также различные схемы фильтров.

4.4. МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ

Существует три способа регулирования выходного напряжения автономных инверторов.

1. При помощи изменения напряжения источника питания автономного инвертора. Этот способ широко применяется в тех случаях, когда в качестве источника питания используется управляемый выпрямитель, но может применяться и в других случаях, когда между инвертором и источником питания устанавливаются специальные регуляторы постоянного напряжения.

2. Регулирование путем воздействия на процессы в инверторе, влияющие на его выходное напряжение. Реализация этого способа зависит от схемы инвертора. Так, в инверторах тока, у которых выходное напряжение зависит от параметров нагрузки, регулирование может быть осуществлено введением в цепь нагрузки регулируемых активных и реактивных элементов. В инверторах напряжения часто применяются схемы регулирования выходного напряжения, основанные на изменении величины реактивной мощности, сбрасываемой в источник питания, что может быть достигнуто, например, использованием в качестве вентилей обратного тока управляемых вентилей. В инверторах с двухступенчатой коммутацией широкое применение находят импульсно-модуляционные методы регулирования выходного напряжения (ШИМ, АИМ и др.). При двух или более инверторах можно применить геометрическое суммирование выходных напряжений отдельных инверторов (рис. 4.42).

3. Регулирование напряжения на нагрузке при помощи стабилизаторов переменного напряжения, устанавливаемых между нагрузкой и инвертором. Этот способ применяется редко из-за ухудшения массогабаритных показателей, а также из-за недостатков самих стабилизаторов.

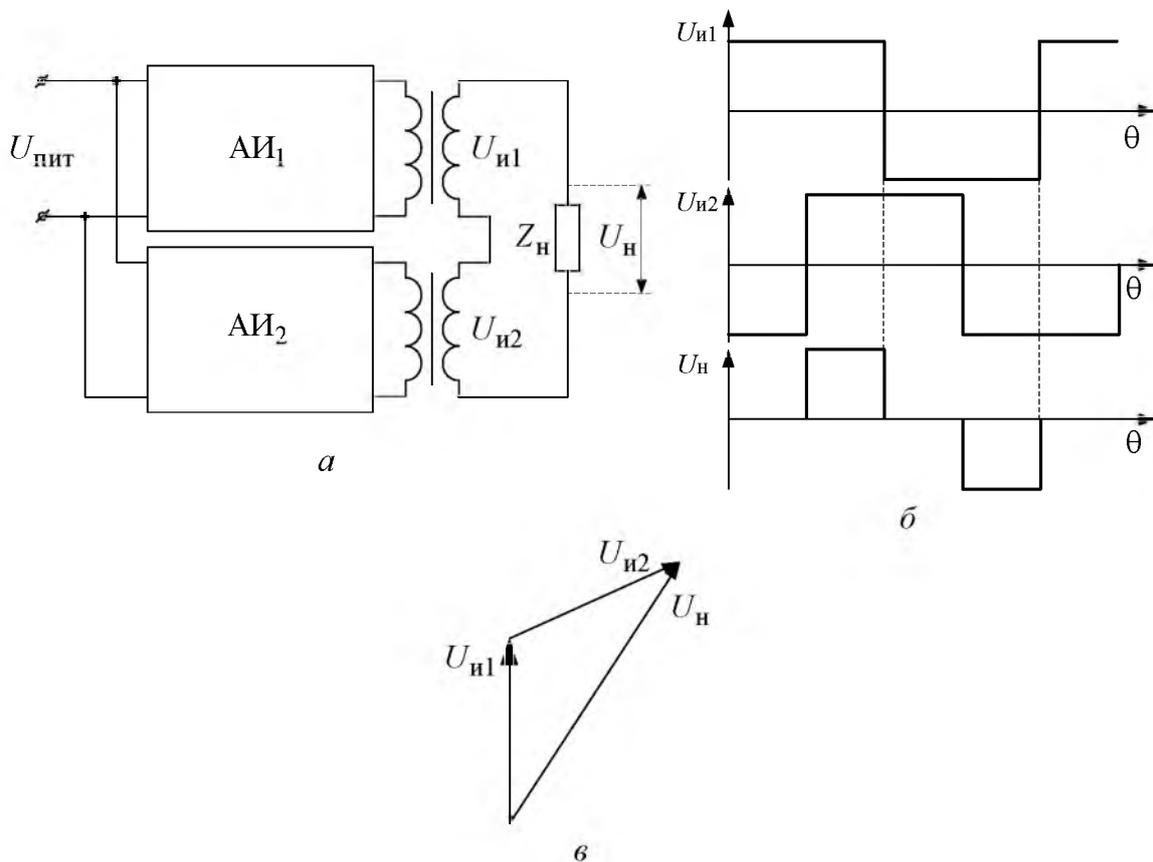


Рис. 4.42. Геометрическое суммирование напряжений двух инверторов

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия зависимого инвертора.
2. Можно ли выполнить зависимый инвертор на неуправляемых ключах?
3. Какие условия необходимо выполнить, чтобы перевести управляемый выпрямитель в режим зависимого инвертора?
4. Каковы особенности коммутационных процессов в зависимых инверторах?
5. Что такое угол опережения в зависимом инверторе?
6. Что такое «опрокидывание» инвертора?
7. Как нужно изменить угол опережения, если напряжение источника питания зависимого инвертора уменьшилось?
8. Объясните входную характеристику зависимого инвертора.
9. Объясните ограничительную характеристику зависимого инвертора.
10. Что такое «критическое значение» входного тока зависимого инвертора?