

В общем случае при M однополярных импульсах на полупериоде кривой выходного напряжения амплитуду n -й гармоники можно найти из выражения

$$U_{n(n)\max} = \frac{8E_d}{n\pi} \sin\left(n \frac{\lambda}{2}\right) \sum_{k=1}^{M/2} \sin(n\beta_k), \quad (12.20)$$

где $k = 1, 2, 3, 4 \dots$

Приравнявая к нулю выражение, стоящее под знаком суммы, находят углы β , соответствующие центрам составляющих импульсов, при которых исключаются наиболее весомые гармоники. Число исключенных гармоник пропорционально числу импульсов, находящихся на четверти периода выходного напряжения. Так, при четырех импульсах на полупериоде (кривая на рис. 12.28) и $\beta_1 = 42^\circ$, $\beta_2 = 78^\circ$ исключаются третья и пятая гармоники. Причем изменяя ширину импульсов и оставляя неизменными углы центров импульсов, можно регулировать действующее значение выходного напряжения при отсутствии исключенных гармоник во всем диапазоне регулирования. Это существенно, так как выходные фильтры рассчитываются на подавление наиболее весомой (после основной) гармоники.

12.5. Трехфазные АИН

Практически трехфазные АИН могут быть реализованы двумя способами:

1) путем использования однофазных мостовых схем с трансформаторным выходом, работающих на общую нагрузку, с фазовым сдвигом на электрический угол 120° (рис. 12.30).

2) с помощью трехфазной мостовой схемы, построенной на базе трех полумостовых схем (рис. 12.31).

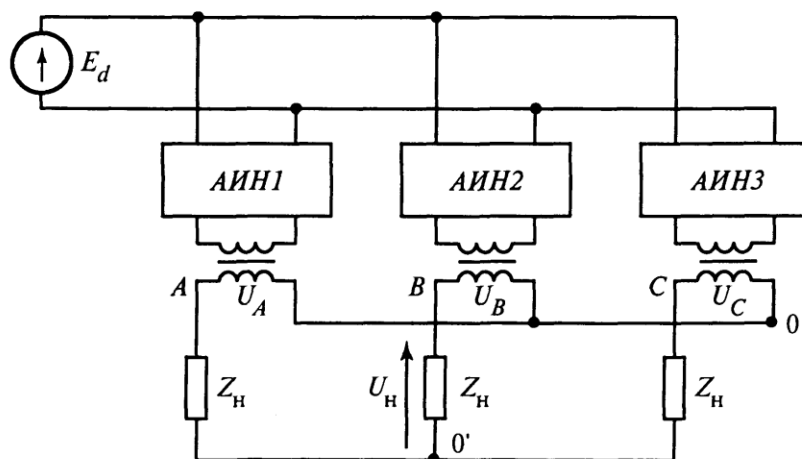


Рис. 12.30

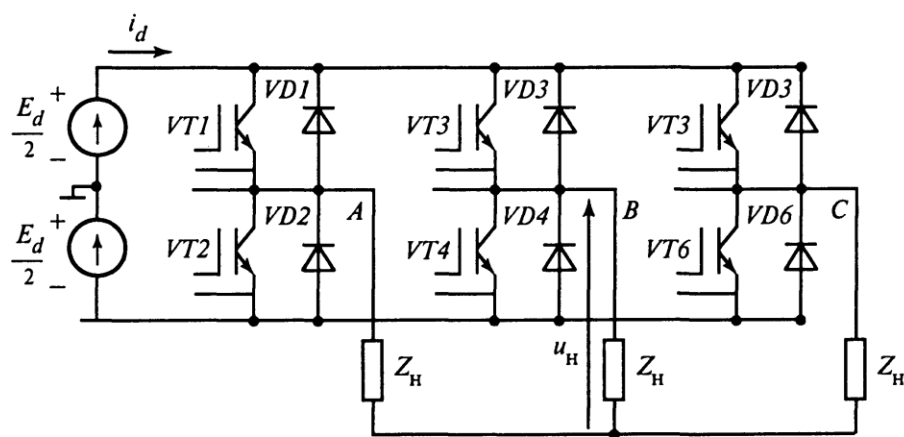


Рис. 12.31

В схеме рис. 12.30 нагрузки можно включать как в звезду, так и в треугольник. Эта схема позволяет осуществлять пофазное регулирование выходного напряжения внутренними средствами, используя ШИР, ШИМ, а также и выборочное исключение гармоник из кривой выходного напряжения. Недосток такого способа реализации трехфазных АИН — обязательное наличие выходного трансформатора и удвоенное число вентильных комплектов по сравнению с обычной трехфазной схемой.

При реализации трехфазной схемы АИН на базе трех полумостовых схем инвертор может работать как с трансформатором, так и без него. Кривая выходного напряжения может формироваться с использованием ШИМ, ШИР и выборочным исключением гармоник.

Рассмотрим несколько подробнее формирование кривой напряжения на нагрузке для схемы рис. 12.31.

Для простоты изучим режим работы АИН, когда вентили полумоста подключают каждую фазу нагрузки к источнику питания E_d на интервале π . Как следует из алгоритма переключения вентилей (рис. 12.32, $a—e$) в схеме рис. 12.31, в любой момент времени одна из фаз нагрузки подключена к одному из полюсов источника питания, а две другие — к другому (рис. 12.33, $a, б$).

Тогда к нагрузке той одиночной фазы, которая подключена к одному из полюсов источника питания, прикладывается напряжение

$$u'_H = \pm E_d \frac{Z_H}{Z_H + \frac{Z_H Z_H}{Z_H + Z_H}} = \pm \frac{2}{3} E_d. \quad (12.21)$$

В то же время две вторые фазы оказываются включенными параллельно и подключенными к другому полюсу источника питания и к ним прикладывается напряжение:

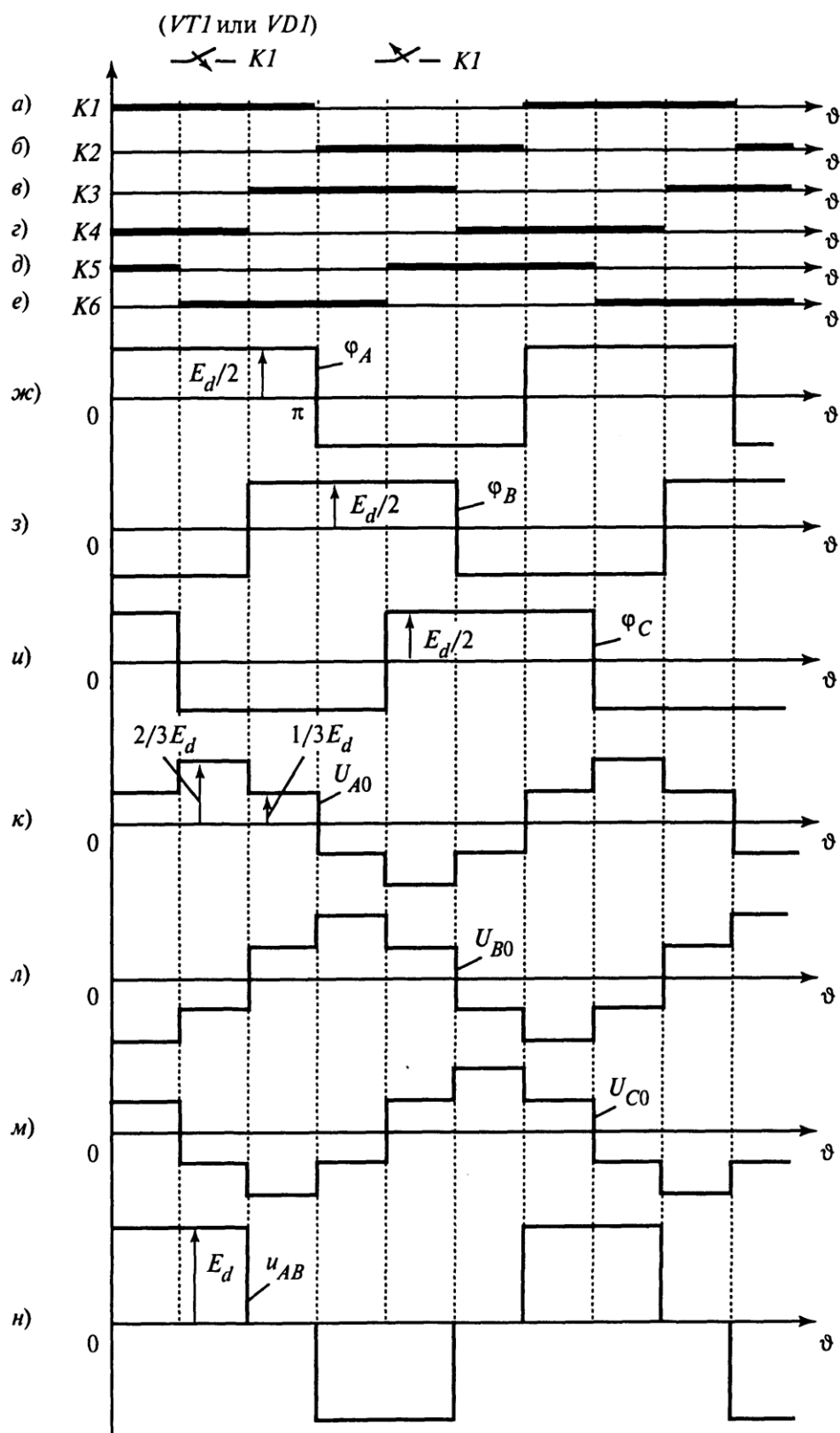


Рис. 12.32

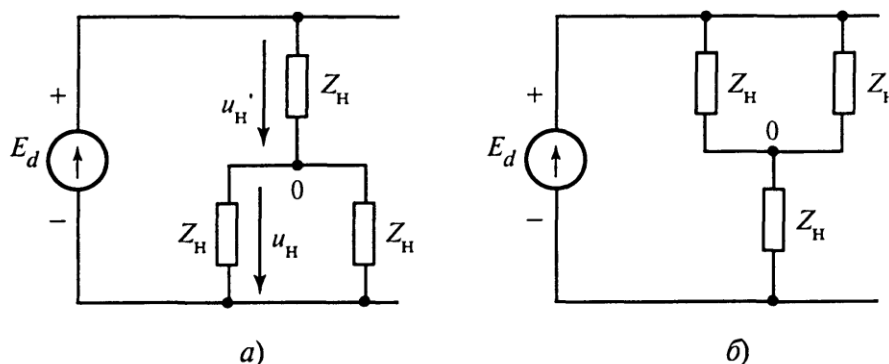


Рис. 12.33

$$u_H = \pm E_d \frac{\frac{Z_H Z_H}{Z_H + Z_H}}{Z_H + \frac{Z_H Z_H}{Z_H + Z_H}} = \pm \frac{1}{3} E_d. \quad (12.22)$$

С учетом вышеизложенного на рис. 12.32, *к—м* построены кривые фазного напряжения на нагрузке. На рис. 12.32, *н* построена кривая одной из фаз выходного линейного напряжения инвертора

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B.$$

В заключение необходимо отметить, что в спектре выходного напряжения отсутствуют четные гармоники, гармоники, кратные трем, а также те гармоники, которые исключаются при селективном методе исключения гармоник. Однако при таком способе формирования кривой выходного напряжения невозможно осуществлять пофазное регулирование выходного напряжения, которое необходимо при изменяемой несимметричной нагрузке. В этом случае можно использовать схему силового блока рис. 12.29.

Контрольные вопросы и задачи

- 12.1. Какие требования предъявляются к переключающим элементам автономных инверторов?
- 12.2. Для чего служат обратные диоды в схемах АИН?
- 12.3. При каких условиях и как осуществляется энергообмен между нагрузкой и источником питания?
- 12.4. При каком условии при расчете токов ключевых элементов АИН можно использовать метод основной гармоники?
- 12.5. Задача: однофазный АИН собран по схеме рис. 12.2. $E_d = 100$ В, $R_H = 10$ Ом, $L_H = 0,064$ Гн, $f_H = 50$ Гц. Определить максимальное значение тока нагрузки $I_{H \max}$.
- 12.6. Задача: однофазный АИН собран по схеме рис. 12.2. Используя метод основной гармоники (считая, что потребляемый от инвертора ток имеет

АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ ТОКА

13.1. Формирование кривой выходного напряжения в автономных инверторах тока

Однофазная схема автономного инвертора тока показана на рис. 13.1. Отличительной особенностью АИТ является наличие достаточно большой индуктивности L_d , что ставит источник питания E_d совместно с индуктивностью L_d в режим источника тока для переменной (изменяющейся) составляющей тока, протекающего через источник питания. Нагрузка включена в диагональ моста. В этом случае ток инвертора i_i , протекающий в диагонали моста, будет иметь знакопеременную прямоугольную форму (рис. 13.2, а), частота тока будет зависеть от частоты переключения диагонально расположенных ключевых приборов (в рассматриваемом случае тиристоров $VT1$, $VT4$ и $VT2$, $VT3$).

Большая индуктивность в цепи источника питания исключает возможность включения обратных диодов, как это делается в АИН для осуществления энергообмена между реактивными элементами нагрузки и источником питания. При активно-индуктивной нагрузке изменение направления тока инвертора i_i не может привести к мгновенному изменению тока нагрузки.

Конденсатор C_k , включенный параллельно нагрузке, служит для организации контура тока нагрузки при изменении направления тока инвертора.

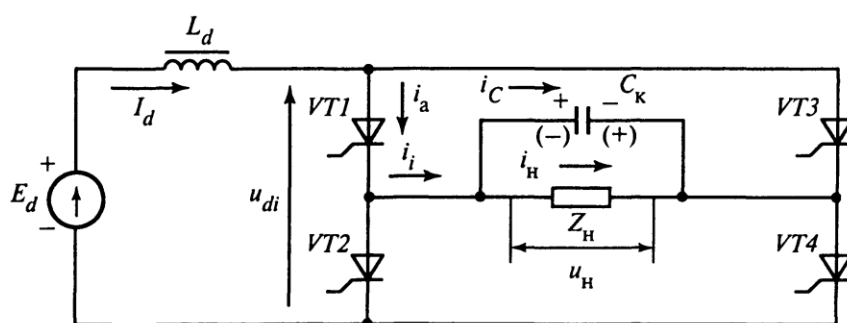


Рис. 13.1

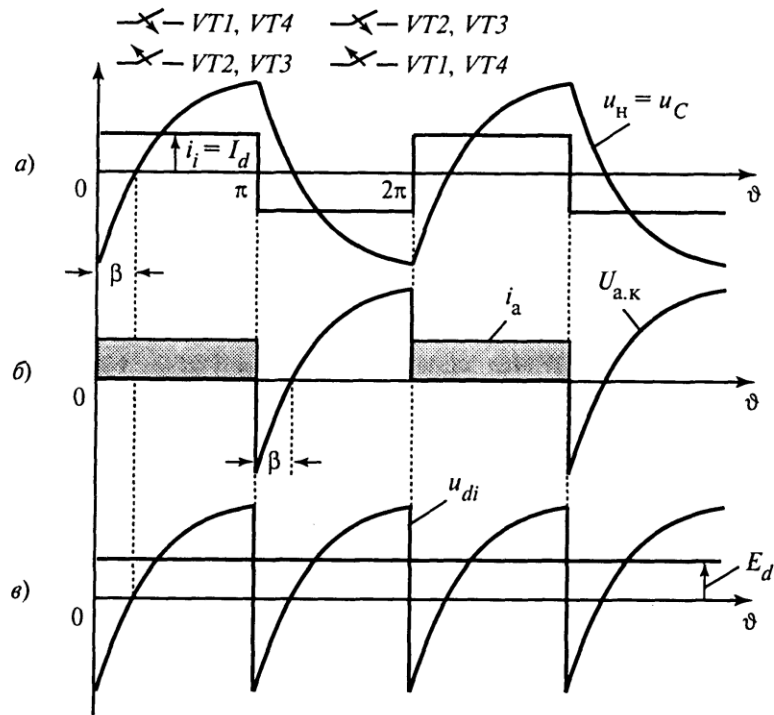


Рис. 13.2

Таким образом, конденсатор C_k позволяет осуществить энергообмен между реактивными элементами нагрузки и становится накопителем энергии. Но это не единственная функция конденсатора. Наличие конденсатора дает возможность использовать в качестве ключевых элементов однооперационные тиристоры.

Известно, что для выключения ранее проводившего тиристора необходимо подать отрицательное напряжение между анодом и катодом. Для создания такого коммутирующего напряжения и служит коммутирующий конденсатор (вторая функция конденсатора C_k). Рассмотрим подробнее процесс выключения тиристоров. При включении тиристоров $VT1$, $VT4$ ток инвертора протекает по контуру $(+E_d) - L_d - VT1 - R_H(C_k) - VT4 - (-E_d)$.

Конденсатор будет заряжаться по экспоненциальному закону (его полярность указана на схеме рис. 13.1 без скобок) со скоростью, определяемой постоянной времени $\tau = R_H C_k$ (рис. 13.2, а).

При подаче управляющих импульсов, разрешающих открыться тиристорам $VT2$, $VT3$, в первый момент времени оказываются открытыми все четыре тиристора. Тогда, как хорошо видно на схеме, напряжение коммутирующего конденсатора прикладывается к ранее проводившим тиристорам с той полярностью, которая приводит к их выключению. Далее ток протекает через тиристоры $VT2$, $VT3$, ток нагрузки течет справа налево, конденсатор заряжается

(его полярность в этот момент показан в скобках), создавая условия для выключения проводящих тиристоров в момент включения очередной пары тиристоров ($VT1$, $VT4$). Изменение напряжения на тиристоре $U_{ак}$ и форма тока тиристора показаны на рис. 13.2, б. На временных диаграммах видно, что на интервале некоторого угла β к тиристору прикладывается отрицательное напряжение, и на временном интервале $t_{восст} = \beta/\omega$ тиристор восстанавливает свои управляющие свойства. Если тиристор не успеет за это время восстановить свои управляющие свойства, то он не выключится, ток будут проводить оба тиристора одного плеча (например, $VT1$, $VT2$) и источник питания будет в режиме короткого замыкания.

Очевидно, что при открытии диагонально расположенных тиристоров входное напряжение инвертора u_{di} будет изменяться по закону изменения напряжения на конденсаторе C_k . При этом среднее значение этого напряжения должно быть равно напряжению источника питания, так как на индуктивности не создается падение напряжения от постоянного тока. Кривая изменения напряжения u_{di} показана на рис. 13.2, в.

На рис. 13.3, а приведена эквивалентная схема замещения выходной цепи АИТ в предположении, что токи и напряжения имеют синусоидальную форму. На рис. 13.3, б показана векторная диаграмма, из которой видно, что угол β , обеспечивающий восстановление управляющих свойств тиристора, тем больше, чем меньше ток нагрузки.

Таким образом, при увеличении тока нагрузки сверх допустимого тиристор не успеет восстановить свои управляющие свойства, в схеме окажутся в проводящем состоянии все тиристоры и наступит аварийный режим (срыв инвертирования), ток источника постоянного напряжения будет ничем не ограничен.

Для определения зависимости выходного напряжения от тока нагрузки (выходная или внешняя характеристика) обратимся к экви-

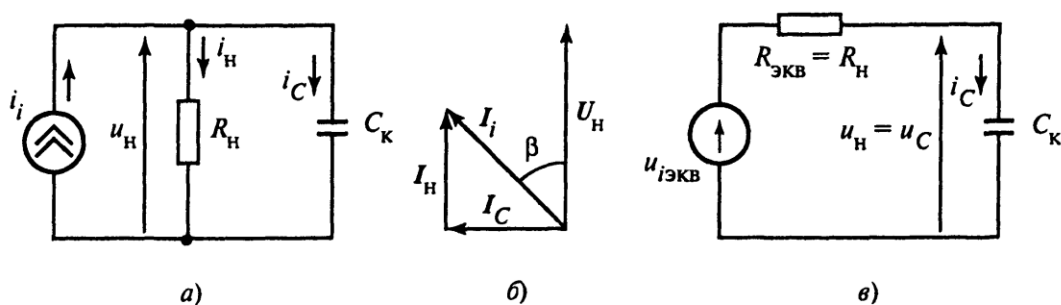


Рис. 13.3

валентной схеме, показанной на рис. 13.3, в. Используя теорему об эквивалентном генераторе, находим

$$u_{i\text{экв}} = i_i R_H, R_{\text{экв}} = R_H.$$

Тогда

$$U_H = U_C = U_{i\text{экв}} \frac{X_C}{X_C + R_{\text{экв}}} = U_{i\text{экв}} \frac{1}{1 + R_H/X_C}. \quad (13.1)$$

Анализируя полученные выражения, можно сделать следующие выводы:

1. Чем больше сопротивление нагрузки (чем меньше ток нагрузки), тем больше значение эквивалентного напряжения в схеме рис. 13.3, а и тем до большего напряжения будет заряжаться конденсатор с большей постоянной времени $\tau = C_K R_H$ (рис. 13.4, в). При холостом ходе (когда $R_H = \infty$, $U_{i\text{экв}} = I_i R_H = \infty$) инвертор тока работать не может. Наоборот, при малых сопротивлениях нагрузки (больших токах) напряжение эквивалентного генератора уменьшается, постоянная времени τ также уменьшается, значит, конденсатор будет перезаряжаться до меньшего напряжения с большой скоростью.

На рис. 13.4, а показаны формы напряжений на нагрузке для двух значений тока нагрузки.

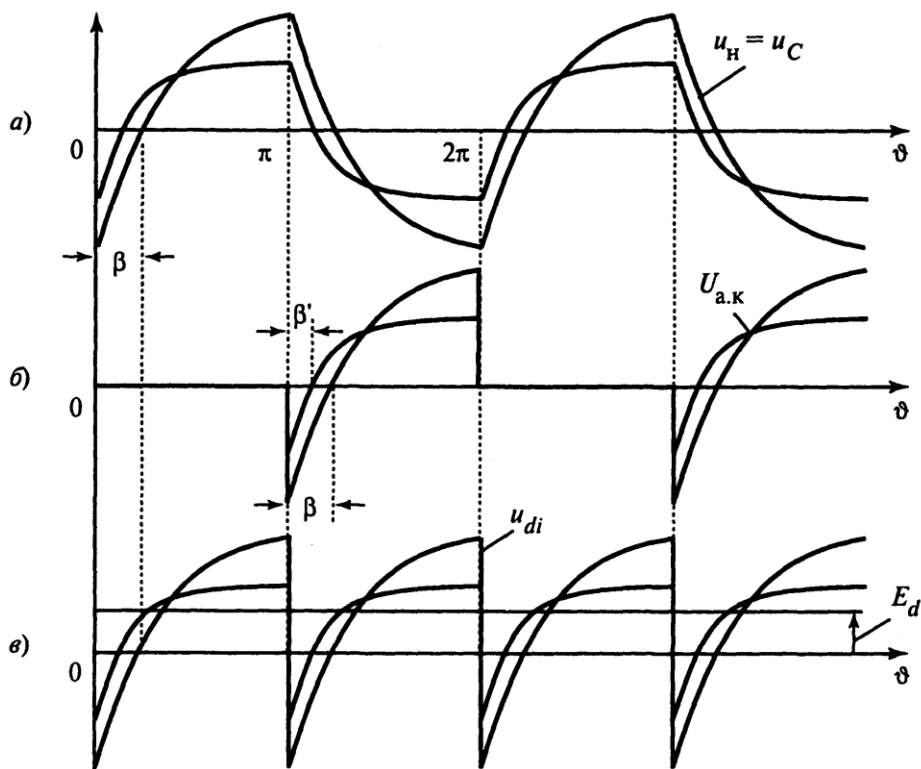


Рис. 13.4

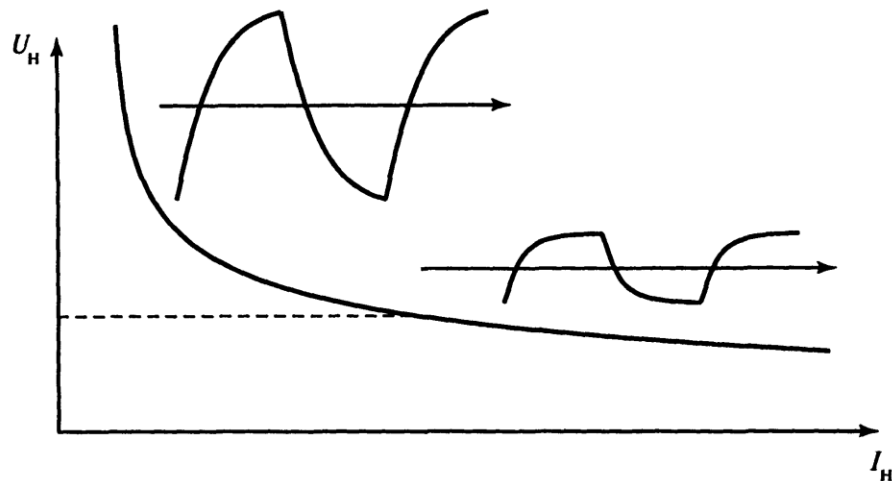


Рис. 13.5

2. Время, предоставляемое на восстановление управляющих свойств тиристоров, $t_{\text{восст}} = \beta/\omega$ при меньших сопротивлениях нагрузки уменьшается, так как уменьшается угол β . Это следует из векторной диаграммы рис. 13.3, б и диаграмм изменения напряжения на вентилях (рис. 13.4, б).

На рис. 13.5 показана выходная характеристика АИТ, которая, как видим, довольно круто падает.

Каким образом можно регулировать или стабилизировать выходное напряжение автономных инверторов тока, рассмотрим в следующем параграфе.

Для расчета схемы воспользуемся методом первой гармоники, т.е. будем считать, что выходной ток инвертора и напряжение на нагрузке изменяются по синусоидальному закону. Это упрощает расчеты, но погрешность в расчетах лежит в пределах 5—10 %.

Кроме того, будем считать, что активные потери в схеме отсутствуют. В этом случае мощность, отбираемая от источника, равна мощности в нагрузке. Тогда можно записать:

$$P_E = P_n$$

или

$$I_d U_d = U_n I_{i(1)} \cos \beta, \quad (13.2)$$

где $I_{i(1)}$ — действующее значение основной гармоники тока инвертора; β — угол сдвига между током и напряжением (см. рис. 13.2, а и рис. 13.3).

Разложение в ряд Фурье кривой тока i_i при нахождении действующего значения этого тока приводит к соотношению

$$I_i = \frac{4I_d}{\pi\sqrt{2}} = 0,9I_d. \quad (13.3)$$

Из векторной диаграммы (см. рис. 3.13, б) следует:

$$\begin{aligned} \cos \beta &= \frac{I_R}{\sqrt{I_R^2 + I_C^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{I_R^2/I_C^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\left[\frac{(U_H/R_H)}{\left(\frac{U_H}{1/(\omega C)} \right)} \right]^2}}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R_H C)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}}. \end{aligned} \quad (13.4)$$

Подставляя полученные соотношения в уравнение баланса мощности источника питания и нагрузки, получаем

$$U_H = 1,11 E_d \sqrt{1 + (\omega \tau)^2}. \quad (13.5)$$

Это соотношение также подтверждает ранее сделанный вывод о том, что при росте сопротивления нагрузки (разгрузке инвертора) напряжение на нагрузке резко возрастает, следовательно, необходимо искать способы стабилизации выходного напряжения при переменной нагрузке.

13.2. Регулирование выходного напряжения АИТ

Выходное напряжение АИТ зависит от тока нагрузки, поэтому его регулирование можно осуществлять путем включения балластной (дополнительной) нагрузки. Изменяя нагрузку, можно изменять выходное напряжение АИТ. Использование регулируемого балласта в виде резистора с активным сопротивлением нецелесообразно, так как регулирование будет осуществляться с отбором активной мощности. Такой способ будет резко уменьшать КПД преобразователя.

Значение напряжения также можно регулировать, изменяя емкость C_k , или используя в качестве регулируемого балласта катушку с регулируемой индуктивностью. Однако практически реализовать регулируемые индуктивности и емкости весьма трудно. В качестве переменной индуктивности используют индуктивно-тиристорное компенсирующее устройство или индуктивно-вентильный регулятор (рис. 13.6, а).

Два встречно-параллельно включенных тиристора (или один симистор) с компенсирующей индуктивностью L_k включаются параллельно нагрузке в АИТ. Предположим, что напряжение на нагрузке изменяется по синусоидальному закону (рис. 13.6, б). Если на тиристоры подавать импульсы управления с углом управления α ,

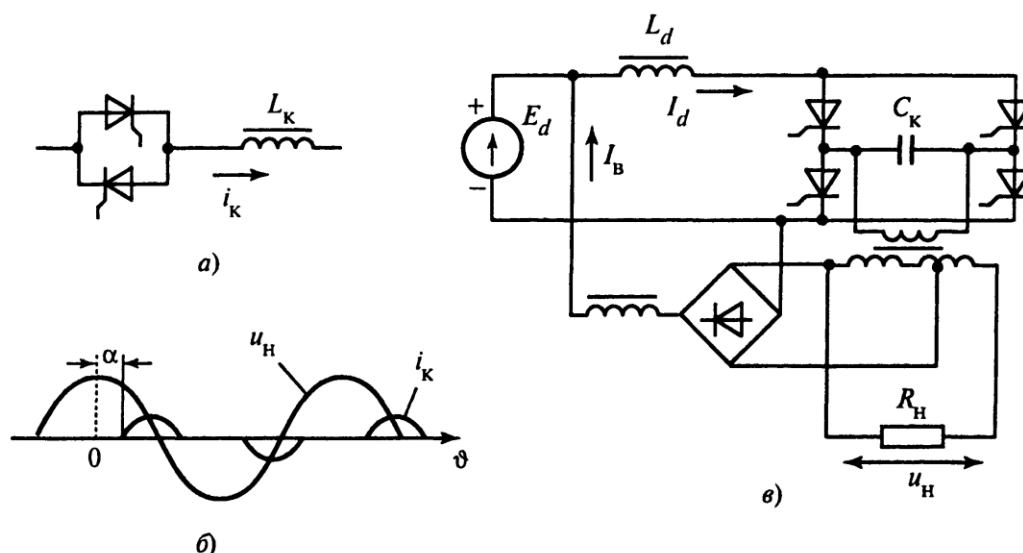


Рис. 13.6

равным нулю, то через индуктивность L_k будет протекать синусоидальный ток (без пауз), отстающий от напряжения на 90° , причем значение этого тока будет максимально возможное: $I_k = U_H / (\omega L_k)$.

Угол управления отсчитывается от момента времени, когда напряжение на нагрузке принимает максимальное значение. При увеличении угла управления α в кривой тока будут появляться паузы, очевидно, что в этом случае действующее значение потребляемого индуктивностью реактивного тока будет уменьшаться.

Таким образом, изменение тока, протекающего через индуктивность, путем изменения угла управления в схеме индуктивно-вентильного регулятора эквивалентно изменению индуктивности и ее реактивного сопротивления.

Итак, система управления тиристорного регулятора должна работать таким образом, чтобы при максимальном токе нагрузки углы управления α были равны 90° . В этом случае тиристоры всегда закрыты и ток регулятора равен нулю. По мере уменьшения тока нагрузки напряжение на нагрузке начинает увеличиваться. Если угол управления регулятора начнем уменьшать, то через регулятор будет протекать ток тем больший, чем меньше угол управления α . Но активная мощность индуктивностью потребляться не будет. Необходимо так согласовать изменение угла управления, чтобы при изменении тока нагрузки общий ток, потребляемый от инвертора, оставался постоянным. В этом случае напряжение на нагрузке не будет зависеть от тока нагрузки.

В качестве балластной для инвертора нагрузки, стабилизирующей выходное напряжение, также может служить управляемый или неуправляемый выпрямитель (рис. 13.6, в).

Нагрузка может включаться через трансформатор, который обеспечивает необходимое значение напряжения на ней при максимальном токе. К части вторичной обмотки подключается выпрямитель, который выпрямляет переменное выходное напряжение инвертора, и через дроссель фильтра такой выпрямитель может отдавать энергию источнику постоянного напряжения E_d .

Коэффициент трансформации выбирается таким образом, чтобы амплитуда переменного напряжения на вторичной обмотке, питающей выпрямитель, была несколько меньше значения напряжения E_d . В этом случае вентили выпрямителя не смогут открываться, так как потенциал анодов этих вентилях всегда будут меньше потенциала катода.

По мере разгрузки инвертора (уменьшения тока нагрузки) напряжение на его выходе возрастает, создаются условия для открывания диодов обратного выпрямителя и через выпрямитель начинает протекать тем больший ток, чем меньше ток нагрузки. В этом случае, как и при использовании вентильного регулятора, ток, отбираемый от инвертора, будет неизменен, а значит, и выходное напряжение инвертора будет неизменным (см. штриховую линию на выходной характеристике рис. 13.5).

Контрольные вопросы и задачи

- 13.1. С какой целью включаются дроссель L_d и конденсатор C_k в схему АИТ?
- 13.2. Почему напряжение на нагрузке при использовании АИТ зависит от нагрузки?
- 13.3. Как можно регулировать или стабилизировать значение выходного напряжения в АИТ?
- 13.4. *Задача:* в схеме рис. 13.1 напряжение питания $E_d = 100$ В, $R_n = 10$ Ом, частота выходного напряжения $f = 1000$ Гц, в схеме используются тиристоры с временем восстановления $t_{\text{восст}} = 100$ мкс. Определить: а) необходимое значение емкости коммутирующего конденсатора C_k ; б) значение напряжения на нагрузке U_n ; в) действующее значение тока нагрузки I_n ; г) значение тока, протекающего через коммутирующий конденсатор, I_C ; д) значение выходного тока инвертора I_i ; е) ток, отбираемый от источника питания I_d ; ж) мощность источника питания P_d .