
Глава одиннадцатая

АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ.

ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИХ СХЕМ

Известно, что электрическая энергия вырабатывается в виде энергии переменного напряжения постоянной частоты со стандартными номиналами или в виде энергии постоянного тока. Тесные рамки частоты 50 Гц и постоянного тока, а также отсутствие сильноточных управляемых вентилях долгое время тормозили развитие устройств преобразовательной техники (главным образом их практическое применение). Появление мощных тиристорх, а затем полевых и IGBT-транзисторов расширило эти рамки, в особенности в области применения статических преобразователей для электропривода переменного тока, на электротранспорте, в электротермии, в качестве источников гарантированного питания, в устройствах стабилизации частоты при переменной частоте вращения первичных генераторов электроэнергии (например, на судах, самолетах) и во многих других случаях.

Автономным инвертором называют статический преобразователь постоянного напряжения в переменное с помощью электронных ключей, который работает на автономную нагрузку или сеть, в которой нет других источников переменного напряжения.

В автономном инверторе форма, значение и частота выходного напряжения определяются режимом его работы. Автономный инвертор может питаться как от источника постоянного напряжения (аккумуляторная или солнечная батарея), так и от выпрямителя, который, в свою очередь, питается от источника переменного напряжения.

По характеру электромагнитных процессов, протекающих в схемах автономных инверторов, все многообразие существующих схем можно разделить:

- 1) на автономные инверторы напряжения (АИН);
- 2) автономные инверторы тока (АИТ);
- 3) автономные резонансные инверторы (АРИ).

При использовании АИН форма и значение напряжения на нагрузке практически не зависят от значения и характера нагрузки. Иными словами, АИН по отношению к нагрузке ведет себя как источник ЭДС, т.е. выходное сопротивление инвертора близко к нулю.

Автономный инвертор тока ведет себя по отношению к нагрузке как *источник тока*, т.е. выходное сопротивление инвертора весьма велико. При этом значение и форма напряжения на нагрузке зависят от значения и характера нагрузки.

При реализации АРИ нагрузка служит составной частью колебательного контура. В этом случае ток нагрузки близок к синусоидальной форме, а его значение практически не зависит от нагрузки, но зависит от параметров реактивных элементов колебательного контура и напряжения источника питания.

Основной принцип реализации схем автономных инверторов заключается в организации связи между источником питания и нагрузкой через электронные ключи (диоды, тиристоры, транзисторы).

Такая связь должна обеспечивать разнополярную импульсную форму напряжения или тока на выходе автономного инвертора. Примеры получения знакопеременного напряжения на нагрузке приведены на рис. 11.1.

Нетрудно видеть, что при периодическом замыкании и размыкании попарно ключей K_1, K_3 и K_2, K_4 в схеме рис. 11.1, а и периодическом замыкании и размыкании ключей K_1 и K_2 в схемах рис. 11.1, б, в к нагрузке R_H прикладывается напряжение источника питания (постоянное напряжение), но с разной полярностью. В схеме рис. 11.1, б к нагрузке прикладывается напряжение $+E_d/2$ или $-E_d/2$ в зависимости от того, какой ключ проводит ток в данный момент времени. В схеме рис. 11.1, в к нагрузке прикладывается напряжение $\pm E_d$ с учетом коэффициента трансформации трансформатора.

Автономный инвертор напряжения питается от источника ЭДС. Источник питания наряду с малым внутренним сопротивлением должен иметь способность проводить ток в обоих направлениях.

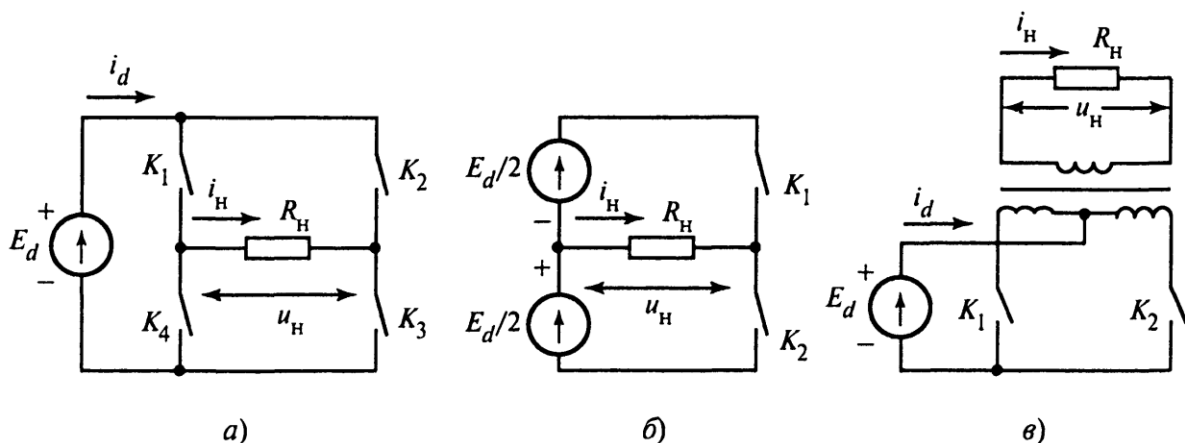


Рис. 11.1

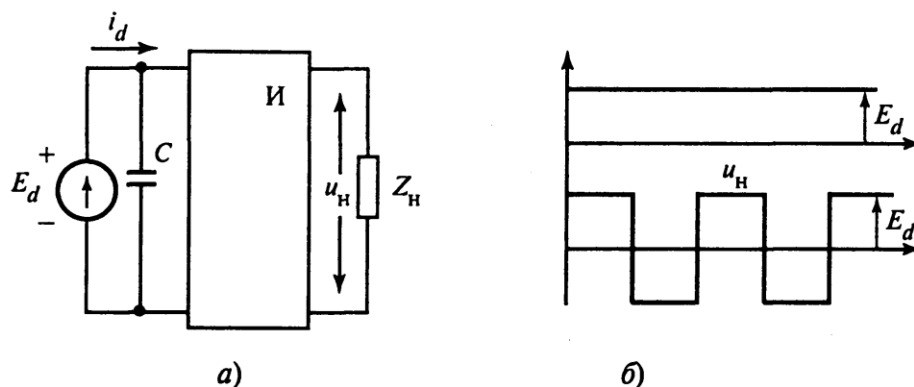


Рис. 11.2

Эти требования для любого источника постоянного напряжения будут удовлетворяться, если выходные зажимы источника питания (вход АИН) будут зашунтированы достаточно большой емкостью, так как сопротивление большой емкости будет весьма мало.

Наличие емкости на входе инвертора является отличительной особенностью АИН (рис. 11.2, а). Мгновенное значение напряжения на нагрузке всегда будет определяться значением напряжения источника питания и не будет зависеть от значения и характера нагрузки, поскольку в любой момент времени нагрузка через проводящие вентили подключена к источнику питания. В силу сказанного напряжение на нагрузке (рис. 11.2, б) имеет импульсный знакопеременный характер.

Отличительная особенность автономного инвертора тока заключается в наличии на входе инвертора катушки с достаточно большой индуктивностью (рис. 11.3, а). Такая катушка имеет большое сопротивление $X_L = \omega L$ для переменной (изменяющейся) составляющей тока источника питания, что ставит его в режим источника тока.

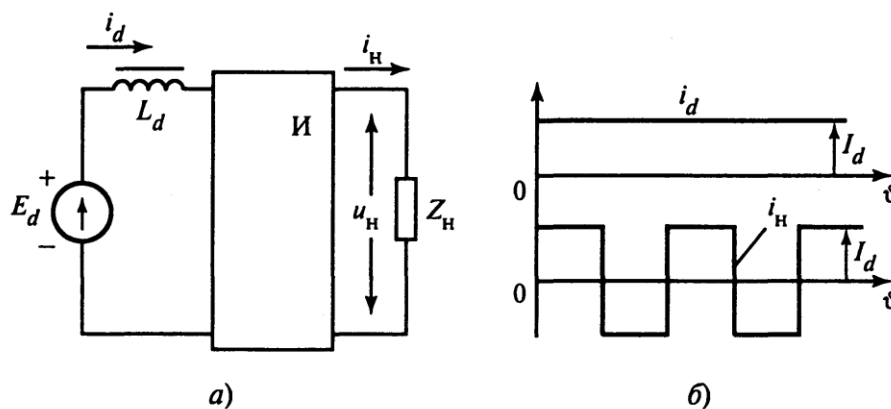


Рис. 11.3

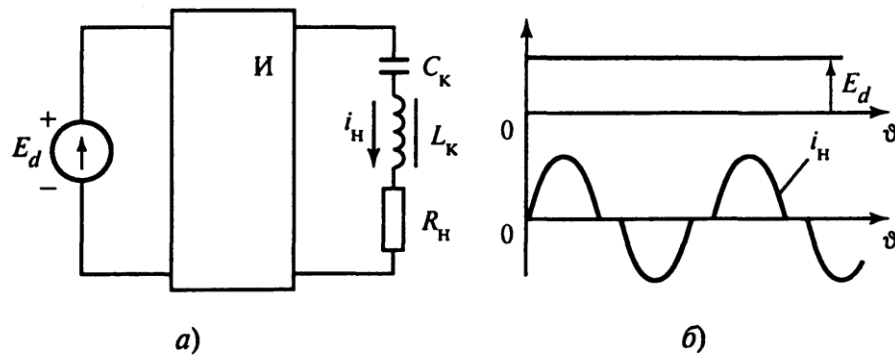


Рис. 11.4

В этом случае ключи инвертора на его выходе изменяют направление тока (рис. 11.3, б). Иными словами, нагрузка питается от импульсного источника тока, что и нашло отражение в названии схемы: *автономный инвертор тока*. При активно-индуктивной нагрузке и изменении направления тока на выходе инвертора энергия, накопленная в индуктивности нагрузки, переходит в энергию конденсатора, специально включенного параллельно нагрузке. Таким образом, наличие большой индуктивности на входе инвертора и конденсатора, включенного параллельно нагрузке, является отличительной особенностью любого автономного инвертора тока.

В автономных резонансных инверторах конденсатор резонансного контура включается параллельно нагрузке или последовательно с ней (рис. 11.4, а). При подключении колебательного контура к источнику питания через соответствующие ключи в нагрузке протекает ток, форма которого на полупериоде близка к синусоидальной (рис. 11.4, б).

Контрольные вопросы и задачи

- 11.1. Какие основные типы автономных инверторов используются в устройствах силовой электроники?
- 11.2. Что является отличительным признаком АИН, АИТ и АРИ?

Глава двенадцатая

АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

12.1. Формирование выходного напряжения АИН

Однофазный инвертор. При реализации схемы автономного инвертора напряжения ключи K должны иметь свойства двусторонней проводимости.

При этом в прямом направлении ключи должны быть управляемыми, т.е. момент включения ключа должен определяться системой управления. Такой ключ может быть реализован на биполярном или полевом транзисторе, на однооперационном или двухоперационном тиристоре, на IGBT-транзисторе или на любом другом приборе, работающем в ключевом режиме и имеющем свойства управления.

Для придания ключу свойства двусторонней проводимости управляемый ventиль шунтируют неуправляемым диодом, включенным во встречном направлении. Примеры таких ключей приведены на рис. 12.1.

Принципиальная схема однофазного мостового АИН на IGBT-транзисторах приведена на рис. 12.2. Временные диаграммы напряжений и токов в различных ветвях схемы даны на рис. 12.3.

Как следует из временных диаграмм, к точке a нагрузки (см. рис. 12.2) прикладывается положительный или отрицательный потенциал источника питания в зависимости от того, какой из ключей левого плеча инвертора [K_1 (VT_1 или VD_1) или K_2 (VT_2 или VD_2)] находится в проводящем состоянии.

То же самое относится и к потенциалу точки b в зависимости от состояния ключей K_3 или K_4 . Если создать условия для периодического включения и выключения диагонально расположенных ключей, то к нагрузке будет прикладываться знакопеременное напряжение (рис. 12.3, a).

Действующее значение такого напряжения

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_d^2 d\vartheta} = E_d. \quad (12.1)$$

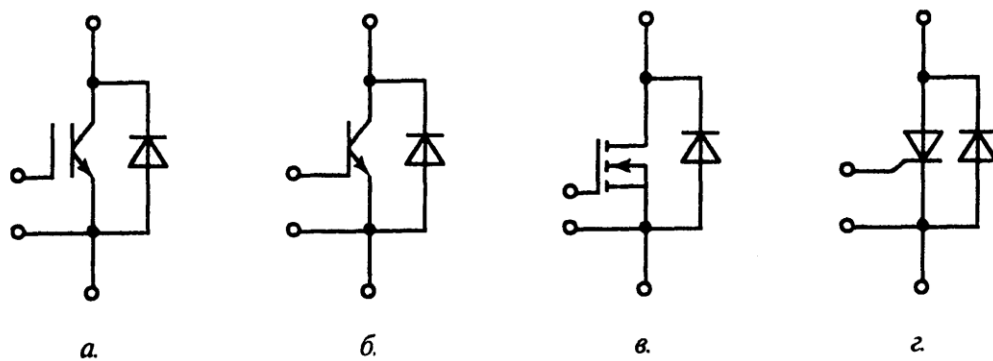


Рис. 12.1

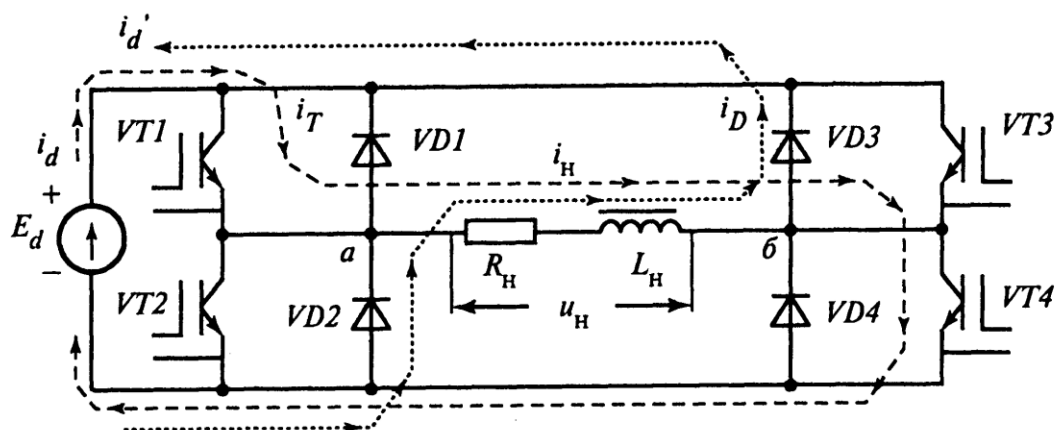


Рис. 12.2

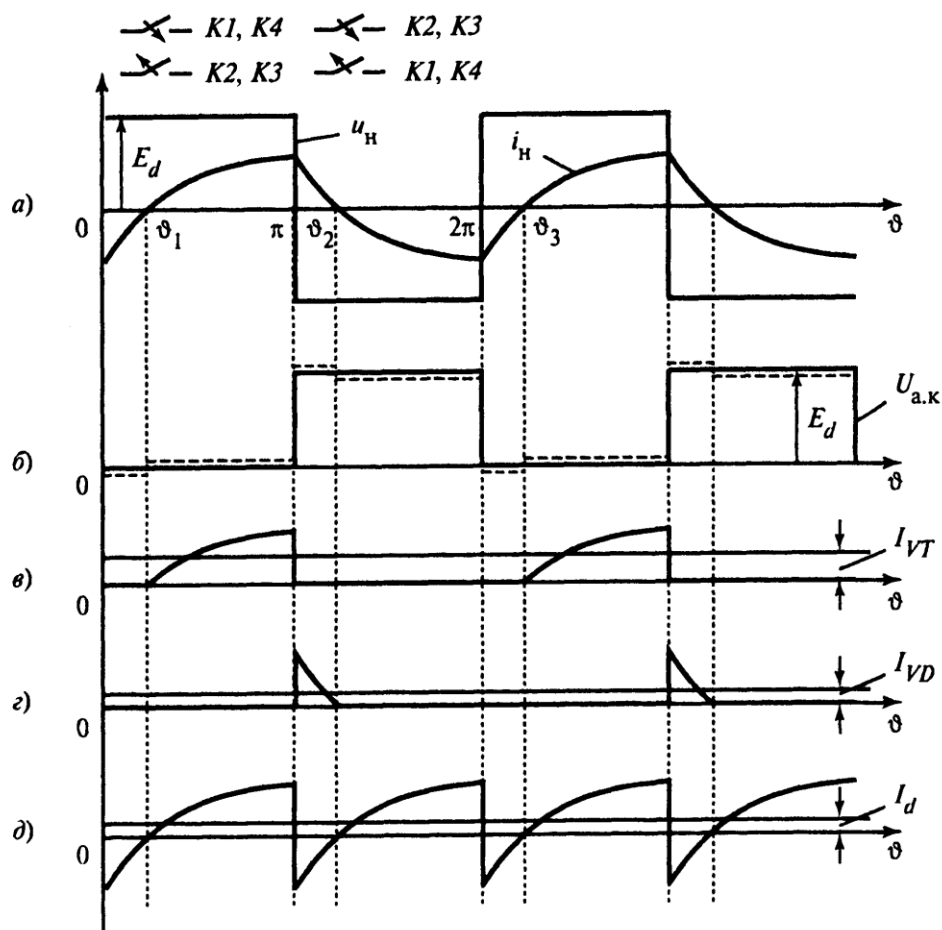


Рис. 12.3

При активной нагрузке форма тока нагрузки будет повторять форму напряжения. Если нагрузка будет иметь активно-индуктивный характер, то при форме напряжения в виде меандра изменение тока нагрузки находится из уравнения Кирхгофа для замкнутого контура в дифференциальном виде:

$$\omega L_n \frac{di_n}{d\vartheta} + i_n R_n = \pm E_d, \quad (12.2)$$

где знак плюс соответствует интервалу от нуля до π для положительного напряжения на нагрузке. В противном случае правая часть отрицательная.

Решение дифференциального уравнения в общем виде содержит принужденную $i_{пр}$ и свободную $i_{св}$ составляющие тока нагрузки и на участке от нуля до π имеет вид:

$$i_n = i_{пр} + i_{св} = \frac{E_d}{R_n} + A e^{-\vartheta/(\omega\tau)}, \quad (12.3)$$

где $\omega = 2\pi f_n$; f_n — частота выходного напряжения на нагрузке инвертора; $\tau = L_n/R_n$.

Постоянная интегрирования A определяется из условия непрерывности тока нагрузки и повторяемости его формы на каждом периоде в установившемся режиме. Ток в конце каждого полупериода равен по абсолютному значению току в начале полупериода, но противоположен по знаку (см. рис. 12.3, а). Исходя из сказанного, можно записать:

$$\text{при } \vartheta = 0 \quad i_n = -I_{n \max}, \quad \text{при } \vartheta = \pi \quad i_n = +I_{n \max}.$$

Подставляя начальные условия в общее решение, получаем:

$$-I_{n \max} = \frac{E_d}{R_n} + A, \quad +I_{n \max} = \frac{E_d}{R_n} + A e^{-\pi/(\omega\tau)},$$

откуда

$$A = -\frac{E_d}{R_n(1 + e^{-\pi/(\omega\tau)})}.$$

Тогда окончательно временная (угловая) зависимость тока нагрузки примет вид

$$i_n = \pm \frac{E_d}{R_n} \left(1 - \frac{2e^{-\vartheta/(\omega\tau)}}{1 + e^{-\pi/(\omega\tau)}} \right). \quad (12.4)$$

Знак плюс соответствует интервалу от нуля до π , в котором напряжение на нагрузке положительное.

Теперь рассмотрим подробнее, по каким контурам протекает ток нагрузки в течение периода выходного напряжения. Начнем рассматривать с интервала ϑ_1 — π . На этом интервале ток проводят транзисторы $VT1$ и $VT4$. Ток проходит от положительного полюса источника питания через названные транзисторы и нагрузку к отрицательному полюсу источника (см. рис. 12.2, штриховая линия). Временная диаграмма тока одного из транзисторов приведена на рис. 12.3, в. В момент времени, соответствующий точке π , система управления снимает сигналы управления с транзисторов $VT1$ и $VT4$ и подает сигналы управления, разрешающие прохождение тока через транзисторы $VT3$ и $VT2$. Транзисторы $VT1$ и $VT4$ запираются, но транзисторы $VT3$ и $VT2$ ток не пропускают, так как при индуктивном характере нагрузки ток не может скачком поменять значение и направление.

Индуктивность нагрузки создает условие для открывания обратных диодов $VD3$ и $VD2$, и ток нагрузки продолжает протекать в том же направлении через названные диоды и источник питания в обратном направлении (см. рис. 12.2, пунктирная линия). При этом полярность напряжения на нагрузке автоматически изменяется, так как точка a нагрузки через диод $VD2$ будет подсоединена к минусу источника питания, тогда как точка b через диод $VD3$ будет подсоединена к положительному полюсу источника питания.

На интервале $\pi - \vartheta_2$ энергия, накопленная в индуктивности нагрузки на предыдущем интервале, возвращается в источник питания. Временная диаграмма тока одного из обратных диодов приведена на рис. 12.3, г. В момент времени, соответствующий ϑ_2 , ток нагрузки изменяет свое направление и создаются условия для прохождения тока через транзисторы $VT3$ и $VT2$. При этом полярность напряжения на нагрузке не изменяется. Ток через эти транзисторы будет протекать до момента их запираания системой управления.

Однако ток нагрузки не может мгновенно изменить свое направление, и индуктивность нагрузки создаст условия для отпираания диодов $VD1$ и $VD4$, что приведет к изменению полярности напряжения на нагрузке. Далее процессы повторяются.

Среднее значение тока, протекающего через один из транзисторов, находим, используя временную диаграмму рис. 12.3, в:

$$I_{VT} = \frac{1}{2\pi} \int_{\vartheta_1}^{\pi} i_n d\vartheta. \quad (12.5)$$

Среднее значение тока, протекающего через один из обратных диодов, определяем, используя временную диаграмму рис. 12.3, з:

$$I_{VD} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{\vartheta_2} i_n d\vartheta. \quad (12.6)$$

Напряжение на ключе (идеальном) равно нулю, если клапан (или обратный диод), подключенный к этому клапану, проводит ток. Когда транзистор (или его обратный диод) не проводит ток, то к нему через проводящий транзистор (или обратный диод) этого же плеча прикладывается положительное напряжение источника питания E_d (рис. 12.3, б, штриховая линия). Если учитывать, что на транзисторе и обратном диоде на этапе проводимости падает небольшое напряжение, то на транзисторе на этапе проводимости будет некоторое положительное напряжение, отличное от нуля, а к подключенному к нему обратному диоду на этапе проводимости будет отрицательное напряжение, равное падению напряжения на диоде (рис. 12.3, б).

То же самое будет происходить на этапе запертого состояния клапана. К напряжению E_d будет прибавляться напряжение открытого другого диода этого же плеча или вычитаться напряжение открытого другого транзистора этого плеча. Осциллограмма напряжения на транзисторе и обратном диоде с учетом реальных вольт-амперных характеристик показана на рис. 12.3, б пунктиром.

Как было показано выше, от источника питания отбирается ток на этапе проводимости транзисторов и ток в источнике меняет свое направление на этапе проводимости обратных диодов. Энергия, накопленная в реактивном элементе нагрузки, возвращается в источник питания. Иными словами, происходит энергообмен (рекуперация электрической энергии) между источником и индуктивностью нагрузки. Этот энергообмен и обеспечивают обратные диоды. Форма тока источника постоянного напряжения показана на рис. 12.3, д.

При питании инвертора напряжения от управляемого выпрямителя наличие емкостного фильтра на входе инвертора является необходимым условием работоспособности схемы. На входе инвертора должен стоять элемент, способный принять электрическую энергию. При отсутствии конденсатора диоды выпрямителя не пропустят ток в обратном направлении на этапе рекуперации электрической энергии. Среднее значение тока источника питания определяется из кривой рис. 12.3, д:

$$I_{VT} = \frac{1}{\pi} \int_{\vartheta_1}^{\pi} i_n d\vartheta. \quad (12.7)$$

На практике на выходе АИН часто используются фильтры, которые приближают форму выходного напряжения, а значит, и выходного тока к синусоидальной. В этом случае токи силовых ключей, обратных диодов и источника питания состоят из отрезков синусоид. Поэтому, как правило, расчет токов при выборе ключевых элементов можно проводить, используя метод основной гармоники, т.е. считать, что от инвертора потребляется синусоидальный ток. Это существенно облегчает расчет схемы.

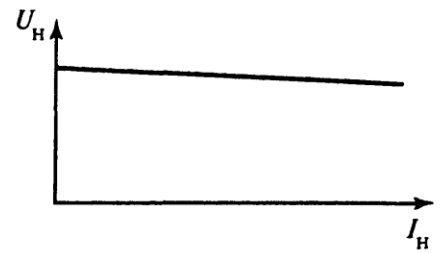


Рис. 12.4

Выходная характеристика АИН (рис. 12.4) достаточно «жесткая», т.е. напряжение на нагрузке очень слабо зависит от значения тока нагрузки.

Спад характеристики определяется активным сопротивлением монтажных проводов и падением напряжения на открытом ключевом элементе инвертора.

12.2. Гармонический состав кривой выходного напряжения

Известно, что токи и напряжения разной частоты активной мощности не дают. Выходное напряжение АИН может принимать значения напряжения источника питания той или иной полярности и формируется в виде последовательности разнополярных прямоугольных импульсов. Очевидно, что спектр такого напряжения богат высшими гармониками, которые необходимо отфильтровывать, приближая форму выходного напряжения к синусоидальной. Часто для оценки качества выходного напряжения АИН пользуются коэффициентом гармоник по напряжению, равным отношению действующего значения напряжения высших гармоник (квадратному корню из суммы квадратов действующих значений высших гармоник) к полному действующему значению напряжения на нагрузке:

$$K_{гн} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{H(n)}^2}}{U_H}. \quad (12.8)$$

Этот коэффициент позволяет судить о совокупности всех гармоник спектра, но не учитывает номера и «веса» присутствующих гармоник. Гармоники более высокого порядка легче отфильтровать, чем гармоники, частоты которых близки к основной.