

**С.Г. Бергштейн**

**Импульсное управление  
скоростью вращения  
электродвигателей**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 621  
ББК 34.4  
С11

- С11 **С.Г. Бергштейн**  
Импульсное управление скоростью вращения электродвигателей / С.Г. Бергштейн – М.: Книга по Требованию, 2016. – 80 с.

**ISBN 978-5-458-53840-4**

Библиотека по автоматике. Выпуск 101.

Настоящая книга знакомит читателя с основами импульсного регулирования скорости вращения электродвигателей. В книге рассматриваются принципы построения и некоторые вопросы теории работы аппаратуры импульсного регулирования, а также даются основные схемы импульсных преобразователей, излагается инженерная методика их расчета и проектирования. В книге приводятся механические и скоростные характеристики электродвигателей при импульсном управлении скоростью. Книга рассчитана на инженерно-технических работников, работающих в области проектирования электроприводов.

**ISBN 978-5-458-53840-4**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2016

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2016

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава первая. Импульсное регулирование скорости вращения электродвигателей . . . . .</b>	<b>7</b>
1-1 Принцип импульсного регулирования . . . . .	7
1-2. Основные схемы импульсного регулирования . .	9
1-3. Механические и скоростные характеристики электродвигателей при импульсном регулировании . . . . .	15
<b>Глава вторая. Устройства для импульсного регулирования скорости вращения электродвигателей (импульсные преобразователи) . . . . .</b>	<b>22</b>
2-1. Принцип действия . . . . .	22
2-2. Импульсный преобразователь на контактных электромагнитных реле . . . . .	25
2-3. Импульсный преобразователь на магнитных реле с контактными реле-повторителями . . . . .	28
2-4. Импульсный преобразователь на полупроводниковых триодах с контактными реле-повторителями . . . . .	32
2-5. Импульсный преобразователь на бесконтактных магнитных реле . . . . .	35
2-6. Импульсный преобразователь с полупроводниковыми триодами на выходе . . . . .	36
2-7. Импульсный преобразователь на полупроводниковых триодах . . . . .	37
2-8. Сравнительная оценка импульсных преобразователей . . . . .	38
	5

<b>Глава третья. Статические характеристики импульсных преобразователей . . . . .</b>	<b>39</b>
3-1. Идеализированные статические характеристики импульсного преобразователя . . . . .	39
3-2. Реальные статические характеристики импульсного преобразователя . . . . .	45
<b>Глава четвертая. Проектирование импульсных преобразователей . . . . .</b>	<b>57</b>
4-1. Исходные данные . . . . .	57
4-2. Расчет параметров импульсного преобразователя	60
4-3. Некоторые вопросы повышения надежности импульсных преобразователей . . . . .	64
<b>Глава пятая. Фазовое представление процессов в импульсном преобразователе . . . . .</b>	<b>68</b>
<b>Литература . . . . .</b>	<b>78</b>

---

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

# ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

### 1-1. ПРИНЦИП ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Сущность импульсного способа управления скоростью вращения электродвигателей состоит в том, что изменение скорости достигается не за счет изменения мощности, непрерывно подводимой к электродвигателю, а путем изменения времени, в течение которого к электродвигателю подводится максимальная мощность. Иначе говоря, при импульсном управлении к электродвигателю подводится последовательность импульсов неизменного напряжения  $U_n$ , в результате чего его работа состоит из чередующихся периодов разгона и торможения. Если эти периоды  $T$ , как показано на рис. 1-1, малы по сравнению с электромеханической постоянной времени электропривода и скорость двигателя  $n$  не успевает к концу каждого периода достигать установившихся значений, то установится некоторая средняя скорость  $n_{ср}$ , величина которой при неизменных моменте нагрузки и напряжении питания будет однозначно определяться относительной продолжительностью включения  $\tau = t_{и}/T$ , где  $t_{и}$  — длительность импульса.

Очевидно, при импульсном управлении мгновенное значение скорости вращения будет непрерывно колебаться в определенных пределах. При этом размах колебаний будет тем меньше, чем больше отношение электромеханической постоянной времени к периоду следования импульсов. Следовательно, с ростом частоты управляющих импульсов размах колебаний скорости уменьшается. Уменьшается размах колебаний скорости и при увеличении электромеханической постоянной двигателя. Среднее значение скорости при этом остается неизменным. Оно может быть изменено, как указывалось выше, только путем изменения относительной продолжительности импульсов  $\tau$ . С ростом относительной продолжительности импульсов, подаваемых на электродвигатель, среднее значение скорости вращения его также растет. При малых значениях  $\tau$  мало и среднее значение скорости вращения.

Чтобы скорость вращения двигателей однозначно определялась величиной относительной продолжительности импульсов  $\tau$ , необходимо, чтобы в период отключения (т. е. паузы) двигатель

тормозился. Если это условие не будет выполняться, то скорость двигателя при любом значении  $\tau$  будет непрерывно увеличиваться, пока не достигнет максимального значения — скорости холостого хода, так как во время импульса скорость его будет возрастать, а во время паузы — оставаться неизменной.

Возможно применение любого вида торможения как механического, так и электрического. Среди электрических способов торможения наибольшее распространение благодаря своей простоте получил динамический способ торможения.

При неизменной относительной продолжительности импульсов  $\tau$  среднее значение скорости будет зависеть от величины мо-

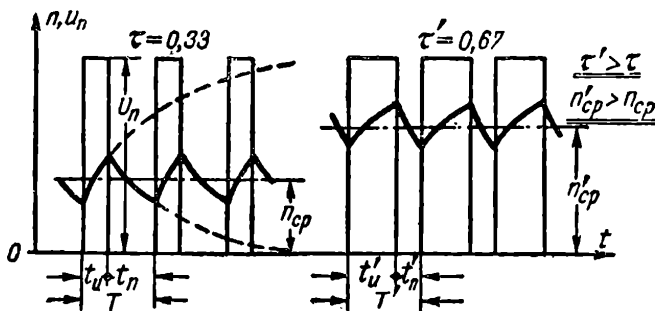


Рис. 1-1. Изменение скорости вращения двигателя при импульсном регулировании.

мента нагрузки  $M_n$  и величины питающего напряжения  $U_n$ . Объясняется это тем, что с изменением  $M_n$  и  $U_n$  изменяется установившееся значение скорости вращения двигателя  $n_{уст}$ . Таким образом, импульсный способ управления позволяет путем изменения относительной продолжительности импульсов в широких пределах регулировать среднюю скорость вращения электродвигателей.

Поскольку в системах автоматического регулирования в подавляющем большинстве случаев сигнал управления выделяется в виде напряжения постоянного тока, импульсное регулирование скорости требует введения в схему специального устройства, назначение которого преобразовывать постоянный или медленно меняющийся сигнал на его входе в последовательность импульсов неизменного напряжения с относительной продолжительностью  $\tau$ , являющейся заданной функцией величины этого сигнала.

Применение импульсного способа управления скоростью электропривода дает возможность получить зону линейности в характеристиках релейных систем и, таким образом, сохраняя все их преимущества, как-то: высокое быстродействие, большие коэффициенты усиления и меньшие, чем в линейных системах, мощности электродвигателя при той же нагрузке, значительно улучшить качество переходных процессов. Импульсный способ управления позволяет получить стабильную зону нечувствительности системы, определяемую только настройкой аппаратуры



управления и не зависящую от разброса величины статического момента нагрузки.

Аппаратура импульсного управления отличается схемной и конструктивной простотой, имеет малые габариты и вес и позволяет легко управлять скоростью вращения обычно перегулируемых электродвигателей постоянного и переменного тока.

## 1-2. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

При импульсном управлении, как уже говорилось, работа двигателя должна состоять из чередующихся между собой периодов разгона и торможения. Достигается это путем периодического изменения либо режима работы двигателя, либо электрических параметров якорной цепи или цепи возбуждения. Эти изменения обычно производятся с помощью электромагнитных реле или электронных ключей. В качестве последних могут быть использованы силовые полупроводниковые триоды, переключающие или управляемые вентили.

На рис. 1-2 приведены основные, наиболее распространенные схемы импульсного регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения. Аналогичные схемы применяются и для импульсного регулирования скорости вращения двигателей с постоянными магнитами, у которых обмотка возбуждения отсутствует. В качестве коммутирующего элемента в схемах рис. 1-2 применены электромагнитные контакторы или реле.

При импульсном управлении управляющие контакты в течение одной части цикла подключают двигатель непосредственно к источнику питания, создавая положительный момент (разгон), в течение же другой либо вводят добавочное сопротивление в цепь якоря или возбуждения (рис. 1-2, *в*, *г* и *з*), уменьшая тем самым положительный момент, либо переводят двигатель в тормозной режим. При этом торможение может быть динамическим (рис. 1-2, *б*, *д* и *е*) или противовключением (рис. 1-2, *ж* и *и*).

В схеме рис. 1-2, *а* торможение двигателя осуществляется наличием на его валу постоянного статического момента нагрузки.

В случае необходимости реверсирования двигателя применяются схемы рис. 1-2, *д*, *е* и *ж* для двигателей с параллельным возбуждением и схема рис. 1-2, *и* для двигателей с последовательным возбуждением.

Схема рис. 1-2, *е* представляет собой классическую мостовую реверсивную схему, широко применяемую в релейных системах управления. Для управления маломощными двигателями число коммутирующих контактов может быть уменьшено (рис. 1-2, *д*). Схема имеет низкий к. п. д. из-за падения напряжения на сопротивлениях  $R_{д.т}$  в рабочую часть цикла.

В схемах рис. 1-2, *ж* и *и* нулевое значение средней скорости имеет место при относительной продолжительности импульсов  $\tau=0,5$ . При возрастании  $\tau$  от 0,5 до 1 двигатель вращается в одну сторону, а при убывании  $\tau$  от 0,5 до 0 двигатель вращается в другую сторону.

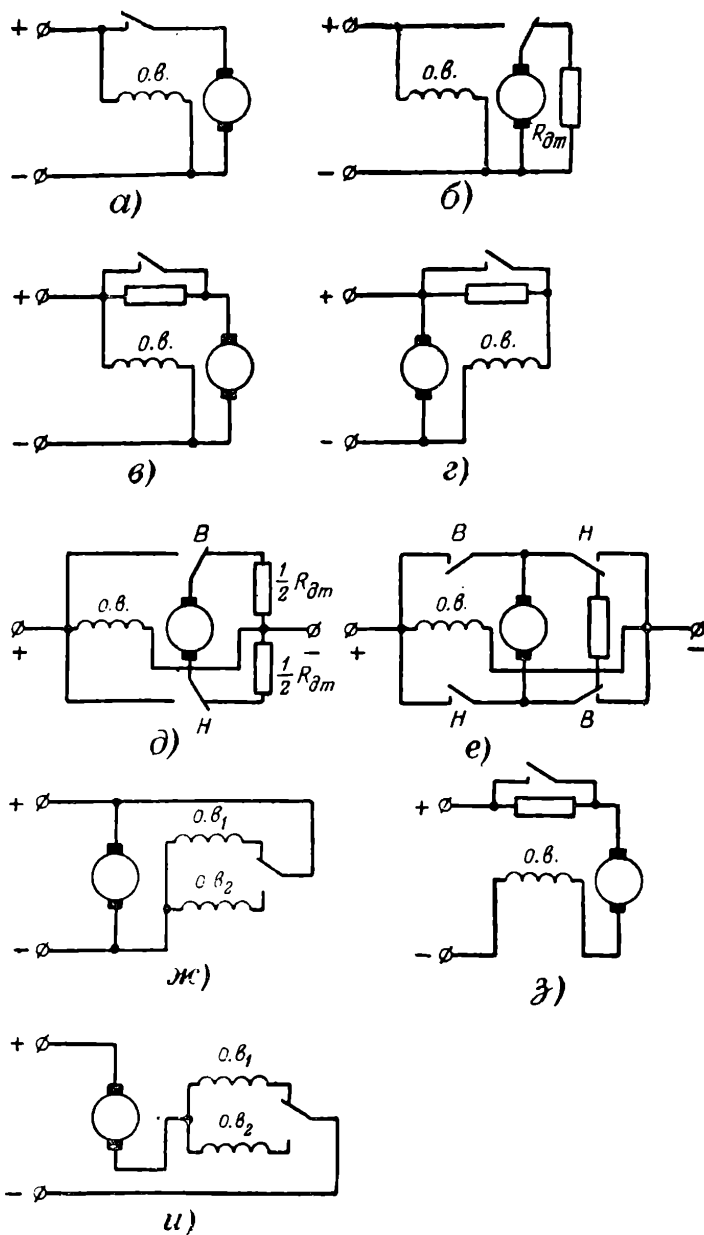


Рис. 1-2. Схемы импульсного регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока с помощью электромагнитных реле.

Наиболее типичные схемы импульсного регулирования скорости асинхронных двигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором приведены на рис. 1-3. Регулирование скорости по схемам рис. 1-3, а и б может производиться в сравнительно

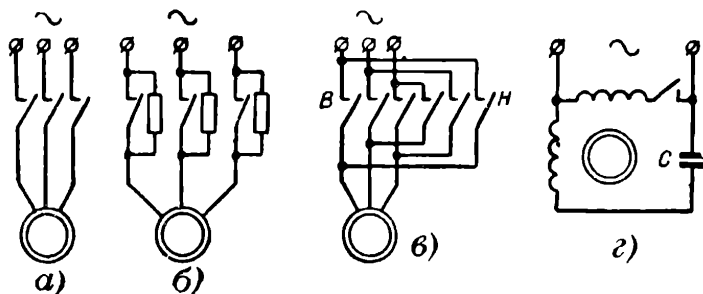


Рис. 1-3. Схемы импульсного регулирования скорости вращения асинхронных двигателей.

широких пределах лишь при относительно больших нагрузках на валу двигателя. В схеме рис. 1-3, в регулирование скорости возможно и при малых нагрузках. Регулирование скорости конденсаторного двигателя (рис. 1-3, г) осуществляется периодическим включением и отключением одной из обмоток статора.

Применение полупроводниковых элементов для непосредственного управления двигателями позволяет построить полностью бесконтактные системы регулирования и тем самым значительно повысить надежность их работы.

На рис. 1-4 приведена простейшая схема управления двигателем постоянного тока по якорю с помощью полупроводникового триода, включенного по схеме с общим эмиттером. При импульсном управлении триод работает в режиме переключения и может коммутировать большую мощность в нагрузке при малой мощности рассеяния. Последнее требует, чтобы в течение импульса триод находился в режиме глубокого насыщения и все напряжение питания практически прикладывалось к якорю двигателя. Для этого управляющий ток базы  $i_{б\beta}$  должен выбираться из условия

$$i_{б\beta} \geq U_{п}/R_{я}.$$

Только в этом случае гарантируется насыщение триода при любом режиме работы двигателя. В момент запираия триода э. д. с. самоиндукции, возникающая в якорю, может вызвать повышение напряжения на триоде выше напряжения пробоя и

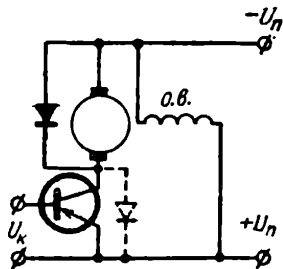


Рис. 1-4. Схема импульсного регулирования шунтового двигателя с помощью триода в цепи якоря.

вывести его из строя. Шунтирование якоря диодом исключает возможность повышения напряжения на триоде выше  $U_n$ . Для защиты триода от перенапряжения в момент его выключения может быть также применен стабилитрон, включаемый параллельно переходу эмиттер — коллектор (на рис. 1-4 показан пунктиром).

При необходимости реверсивного управления двигателем может быть применена мостовая схема на полупроводниковых

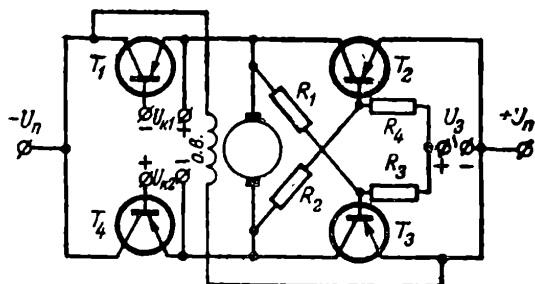


Рис. 1-5. Реверсивная схема импульсного регулирования шунтового двигателя на триодах.

триодах (рис. 1-5). Схема управляется прямоугольными импульсами  $U_{k1}$  и  $U_{k2}$ , полярность которых определяет направление вращения двигателя. Если с помощью управляющего напряжения будет открыт триод  $T_1$ , то благодаря наличию внутренней связи через сопротивление  $R_1$  окажется открытым и триод  $T_3$ . При этом триоды  $T_2$  и  $T_4$  будут закрыты. При смене полярности управляющих сигналов аналогичным образом окажутся открытыми триоды  $T_2$  и  $T_4$ , а закрытыми  $T_1$  и  $T_3$ . Для запираания триодов  $T_2$  и  $T_3$  используется дополнительный источник напряжения  $U_3$ .

На полупроводниковых триодах могут быть практически осуществлены все те же схемы импульсного управления, что и на контактных электромагнитных реле.

Особый интерес представляют освоенные в последнее время нашей промышленностью переключающие и управляемые кремниевые вентили (тиристоры) на основе четырехслойной структуры  $p-n-p-n$ . Применение этих вентилях позволяет значительно упростить схему управления, так как, обладая высокими коэффициентами усиления, они не требуют введения многокаскадных усилителей для их включения. Поскольку вольт-амперная характеристика вентилях этого типа имеет два устойчивых положения (рис. 1-6, в), при работе на постоянном токе схема должна содержать элементы, обеспечивающие возврат управляемого переключателя из проводящего состояния в запертое.

На рис. 1-6, а приведена неревверсивная схема импульсного управления, построенная на управляемых вентилях (тиристорах). При подаче на вход трансформатора  $Tr_1$  последовательности прямоугольных импульсов напряжения  $U_k$  во вторичных

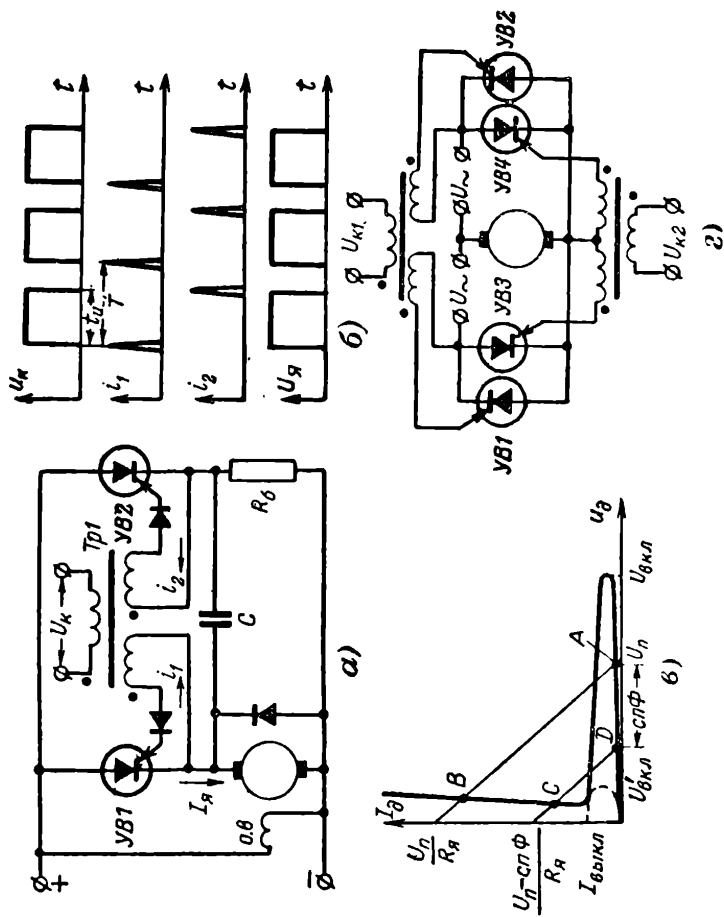


Рис. 1-6. Схемы импульсного регулирования шунтового двигателя на управляемых вентильях.

обмотках, включенных на управляющие электроды, появятся короткие токовые импульсы  $i_1$  и  $i_2$ , сдвинутые друг относительно друга на время импульса  $t_n$  (рис. 1-6,б). Под воздействием импульса  $i_1$ , задаваемого передним фронтом управляющего импульса  $U_n$ , произойдет снижение напряжения переключения вентиля диода УВ1 до величины  $U'_{вкл}$  и рабочая точка скачком переместится из положения А в положение В, определяемое точкой пересечения вольт-амперной характеристики вентиля с нагрузочной прямой двигателя при неподвижном якоре (рис. 1-6,в). По мере увеличения скорости вращения якоря рабочая точка постепенно смещается по прямой ВС в точку С. При этом во

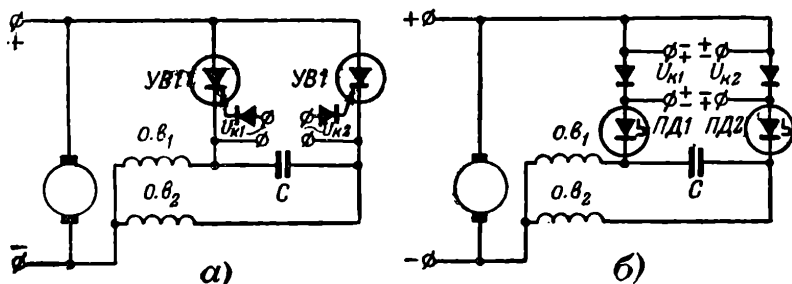


Рис. 1-7. Реверсивная схема импульсного регулирования двигателя по обмоткам возбуждения.

а — на управляемых и б — на переключающих диодах.

избежание самопроизвольного выключения диода параметры схемы должны быть выбраны так, чтобы ток якоря  $I_{я}$  оставался больше тока выключения  $I_{выкл}$ . После прихода импульса  $i_2$  включается диод УВ2. Благодаря напряжению на конденсаторе С диод УВ1 оказывается при этом смещенным в обратном направлении и выключается. Начинается пауза. С приходом следующего импульса  $i_1$  снова включается вентиль УВ1 и далее схема работает в описанной выше последовательности.

При необходимости реверсирования двигателя по якору использование управляемых вентилях и переключающих диодов для построения мостовых реверсивных схем на постоянном токе затрудняется тем, что время включения таких приборов во много раз меньше времени выключения. Реверсирование двигателей постоянного тока с помощью управляемых вентилях может осуществляться в схеме моста переменного тока с управляемыми вентилями (рис. 1-6,з).

Во многих случаях оказывается целесообразным в целях упрощения силовой части схемы сочетать регулирование скорости двигателя по цепи якоря с реверсированием по цепи обмотки возбуждения. На рис. 1-7 приведены схемы реверсирования двигателя путем переключения обмоток возбуждения с использованием управляемых вентилях (рис. 1-7,а) и переключающих диодов (рис. 1-7,б) вентилях. Управление последними производится подачей импульсов, повышающих напряжение на переключаемом диоде выше  $U_{вкл}$  (рис. 1-6,в).