

## **ЛЕКЦИЯ 8 КУРСА «СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА».**

**Двадненко В.Я.**

### **Силовые преобразователи. Зарядные устройства электромобилей. Инверторы вентильных электродвигателей. Направления развития силового электронного оборудования автомобилей**

#### **Силовые преобразователи**

Импульсные преобразователи нашли широкое применение для преобразования напряжений и токов с почти неизменной мощностью на выходе по отношению ко входной мощности, т. е. с высоким КПД, а значит минимальными потерями мощности на это преобразование. Это условие является важнейшим в силовой электронике т. к. потери приводят к нагреву устройства, кроме того импульсные преобразователи применяют также из-за возможности существенно уменьшить вес, габариты и их стоимость.

Импульсное преобразование токов и напряжений по сравнению в традиционным трансформаторным преобразованием на промышленной частоте (50 Гц) имеет преимущества благодаря переходу на высокую частоту преобразования (16 -100 кГц), а также благодаря использованию импульсных методов регулирования (стабилизации) вместо компенсационных. Импульсные преобразователи имеют более широкую область применения также благодаря возможностям преобразований постоянного напряжения в постоянное напряжение, переменного в постоянное, постоянноого в переменное, переменного в переменное, но с другой частотой и еще ряду других возможностей.

Все импульсные преобразователи используют управляемые силовые ключи. Преобразователи делятся на одноконтные, при использовании одного ключа, двухконтные при использовании двух и более ключей. Двухконтные делятся на пушпульные и полумостовые (2 ключа), однофазные мостовые (4 ключа) и трехфазные мостовые (6 ключей). Полумостовые и мостовые импульсные преобразователи также делятся на нерезонансные и резонансные.

Однотактные преобразователи без гальванической развязки строят на основе энергии запасаемой в индуктивности. Вначале рассмотрим понижающий преобразователь (понижающий DC-DC преобразователь или понижающий buck преобразователь). Схема такого преобразователя приведена на рис.1. Входное напряжение  $U_{in}$  подается на вход IN генератора широтно-импульсной модуляции (ШИМ), который выдает управляющий сигнал на электронный ключ S1. Период ШИМ  $T$  – это сумма времени открытого состояния ключа  $t_{on}$  и времени закрытого состояния ключа  $t_{off}$ :

$$T = t_{on} + t_{off}$$

Величина обратная периоду называется частота ШИМ :  $f = 1/T$ , а величина  $D = t_{on} / T$  называется коэффициент заполнения.

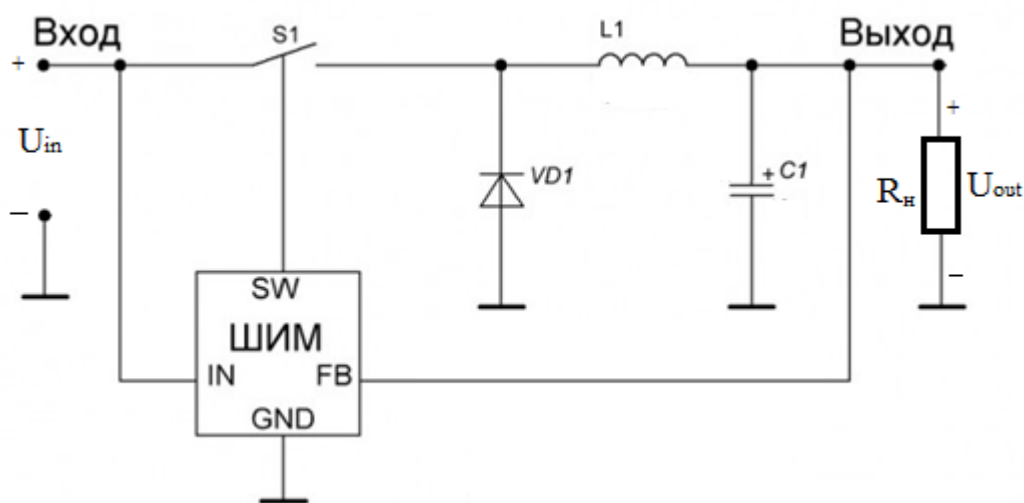


Рис.1. Понижающий преобразователь

С момента подачи напряжения  $U_{in}$  на вход IN блока управления ШИМ этот блок через выход SW подает управляющий сигнал на замыкание управляемого электронного ключа S1. В первой стадии работы, когда ключ S1 замкнут, т.е. во время  $t_{on}$ , входное напряжение  $U_{in}$  вызывает нарастание тока через дроссель (индуктивность) L. Ток течет и через нагрузку  $R_n$ , а также через L1 течет ток заряда C1. Напряжение на выходе преобразователя ( $U_{out}$  на  $R_n$ ) растет, это напряжение подключено ко входу FB

блока управления, поэтому, когда это напряжение достигнет верхнего порога, произойдет отключения ключа S1, наступит вторая стадия, т.е. время  $t_{off}$ . Ток через L1 не может исчезнуть мгновенно, так как в индуктивности накоплена энергия  $LI^2/2$ , ток пойдет через диод VD1 и этот ток будет уменьшаться из-за потерь. Будет также уменьшаться напряжение на выходе и когда оно достигнет нижнего порога с выхода блока управления SW придет команда на замыкание ключа S1 и опять наступит время  $t_{on}$ . Процесс повторится. Напряжение на выходе  $U_{out}$  преобразователя будет зависеть от коэффициента заполнения управляющего сигнала, управляющего ключем S1.

$$U_{out} = U_{in} t_{on} / (t_{on} + t_{off}) = U_{in} D$$

Таким образом уменьшить напряжение можно в необходимое число раз.

Повышающий boost преобразователь по своему принципу работы похож на понижающий buck преобразователь, т.к. в обоих случаях есть две стадии работы. На 1-й стадии происходит накопление энергии в дросселе при этом нагрузка питается от выходного конденсатора. На 2-й стадии происходит передача энергии из дросселя в нагрузку и одновременно заряжается выходной конденсатор, который будет обеспечивать энергией нагрузку пока дроссель будет «перезаряжаться». Рассмотрим рис.2, где приведена схема повышающего преобразователя. Разберем стадии работы boost преобразователя.

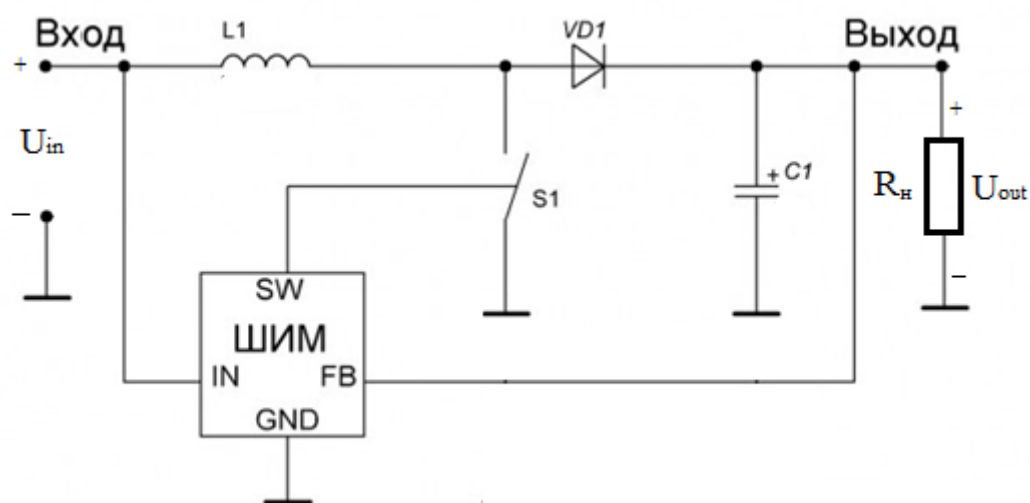


Рис.2. Схема повышающего преобразователя.

*Стадия накопления заряда.* В момент включения преобразователя выходная емкость  $C1$  находится под потенциалом  $U_{in}$ , т.к. ток проходит через дроссель  $L1$  и диод  $VD1$ . Управляющее устройство (ШИМ-контроллер) начинает генерировать ШИМ-сигнал и подает его на управление электронным ключом  $S1$ . При открытии ключа  $S1$  получается, что цепь замыкается, индуктивность  $L1$  подключается с источнику питания и начинает накапливать энергию. Ток через  $VD1$  не протекает, т.к. потенциал на катоде у него выше (около  $V_{in}$ ), чем потенциал на аноде (потенциал GND, около 0В).

*Стадия разряда индуктивности.* Теперь ШИМ-сигнал меняет свое значение с 1 на 0 и ключ  $S1$  закрывается. В этот момент дроссель  $L1$  стремится поддержать значение тока, путем увеличения потенциала. На входе дросселя потенциал все тем же  $U_{in}$ , а следовательно, потенциал вырастает в точке «дроссель-ключ  $S1$ -анод  $VD1$ ». Когда потенциал в данной точке станет больше, чем потенциал на катоде  $VD1$  ток начнет протекать через  $VD1$  в нагрузку и параллельно заряжать выходную емкость  $C1$ . На этой стадии цепь так же замыкается, но уже не через  $S1$ , а через путь « $L1$ - $VD1$ - $C1$ -нагрузка». Дальше эти стадии просто чередуются. Рассмотрим, за счет чего повышается напряжение. В момент, когда  $S1$  закрылся дроссель начинает разряжаться и в момент этой «разрядки» напряжение на нем стремится к бесконечности. Это в идеальной системе, а в реальной напряжение будет ограничено сопротивлением нагрузки, которое включено последовательно с дросселем и диодом, а также еще и обратной связью управления. Тут стоит еще дополнить по стадии накопления энергии. В момент включения в выходном конденсаторе  $C1$  практически нет запасенной энергии, но после первой стадии разряда он заряжен и потенциал на нем равен  $U_{out}$ , а значит на последующих стадиях накопления энергии эта емкость  $C1$  будет обеспечивать нагрузку энергией, в результате для нагрузки не будет перебоев в получении энергии. Из этого следует, что  $C1$  должен иметь такую емкость, чтобы запасенной энергии хватило на обеспечение питания нагрузки на длительность открытия транзистора ( $t_{on}$ ). Теперь рассмотрим, что у нас происходит с напряжением, какую связь имеет выходное напряжение с напряжением на входе преобразователя.

$$U_{out} = U_{in} / (1-D)$$

Регулировать выходное напряжение можно изменяя коэффициент заполнения ШИМ-сигнала. Из формулы регулирования так же следует и алгоритм:

- Чтобы увеличить напряжение на выходе необходимо увеличить коэффициент заполнения;
- Чтобы уменьшить напряжение на выходе необходимо уменьшить коэффициент заполнения.

Повышающие boost преобразователи имеют ряд особенностей, которые накладывают ограничения на использования данной топологии:

- *Выходное напряжение не должно превышать входное более, чем в 3...4 раза.* При большом коэффициенте заполнения получается, что транзистор открыт почти всегда, а значит через него протекает ток и мы получаем максимально возможное значение статических потерь, а значит и низкий КПД. Для примера бустер корректора коэффициента мощности работают при соотношении максимум 1:4, а именно, тот самый универсальный вход 85...265VAC или же стабилизатор напряжения с их 90...310VAC.
- *Напряжение на ключевом транзисторе.* Данное ограничение тесно связано с тезисом о соотношении выше и вот почему... Транзистор должен иметь напряжение сток-исток (коллектор-эмиттер) равное минимум выходному напряжению, а в реальных устройствах иметь еще и запас хотя бы 20% на пульсации. Высоковольтные ключи имеют большое сопротивление канала, а при большом соотношении напряжений и ток на входе будет очень большим, что приведет к большим потерям на транзисторе;
- *Напряжение диода.* Если внимательно посмотреть на схему преобразователя, то станет понятно, что к диоду VD1 прикладывается напряжение равное выходному, диод должен выдерживать это напряжение с запасом во всех условиях.

Повышающий преобразователь разумно использовать, когда требуется увеличить напряжение максимум в 3...4 раза и при этом не нужна гальваническая развязка, в остальных случаях уже нужно смотреть в сторону топологий push-pull или full bridge и пользоваться повышающими трансформаторами. Мощность для boost преобразователей в принципе не имеет верхней границы, бывают и корректоры коэффициента мощности на десятки киловатт и инверторы для солнечных электростанций на мегаватты, которые построены на данной топологии.

В тех случаях, когда нужна гальваническая развязка, например, от напряжения сети переменного тока, применяют высокочастотные импульсные трансформаторы. Пример такого одноконтурного сетевого AC-DC преобразователя с гальванической развязкой приведен на рис.3.

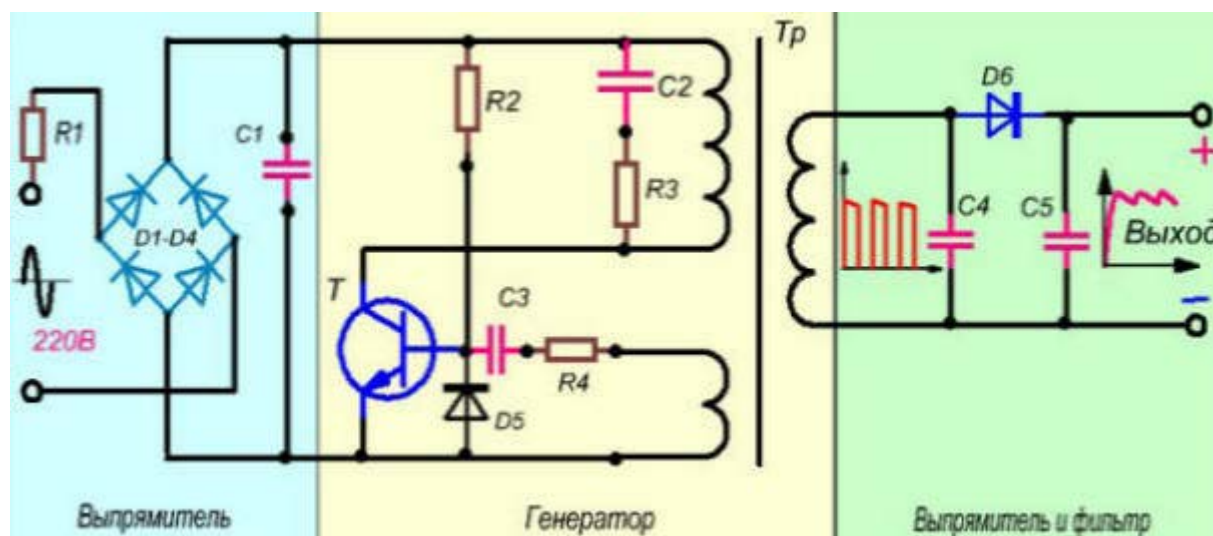


Рис.3. Одноконтурный сетевой AC-DC преобразователь

По такой схеме собраны различные зарядные устройства, например, для сотовых телефонов. Одноконтурная схема ИБП состоит из выпрямителя (D1 – D4) с защитным резистором (фузистором) R1 и со сглаживающим конденсатором C1. В нем напряжение сети 220 вольт преобразуется в постоянное напряжение около 310 вольт. Затем с помощью генератора импульсного напряжения по схеме блокинг-генератора (транзистор T, трансформатор Tr), вырабатываются импульсы прямоугольной формы.

С вторичной обмотки прямоугольные импульсы поступают на выпрямитель (Д6) со сглаживающим конденсатором (С5), получается постоянное напряжение. Само преобразование напряжения происходит на ферритовом трансформаторе. Выходное напряжение зависит от соотношения витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Существенным недостатком однотактной схемы преобразователя является большое напряжение самоиндукции, наводимое в первичной обмотке трансформатора, превосходящее входное напряжение питания в 2-4 раза. В таких схемах нужны транзисторы, имеющие максимальное напряжение коллектор - эмиттер равное 700-1000 вольт.

Применяют различные способы снижения выбросов напряжения на коллекторе транзистора: включаются RC цепочки (С2, R3) параллельно первичной обмотке трансформатора и конденсатор С4 в цепи вторичной обмотки.

При использовании дополнительных устройств стабилизации выходного напряжения, например, используя ШИМ-стабилизацию, возможна работа однотактного ИБП при изменении подключаемой нагрузки в широких пределах (от  $P=0$  до  $P_{max}$ ) при неизменном выходном напряжении. Применяются и линейные стабилизаторы после выпрямителя во вторичной обмотке.

Рассмотрим двухтактную схему АС-DC преобразователя. Двухтактная автогенераторная схема ИБП состоит из выпрямителя входного переменного напряжения 220 вольт, устройства запуска генератора, генератора прямоугольных импульсов и выпрямителя выходного напряжения с конденсатором фильтра.

На рисунке 4 изображена простая наиболее распространенная двухтактная схема автогенераторного, импульсного преобразователя – инвертора, полумостовая схема. По сравнению со схемой однотактного автогенератора, двухтактный автогенератор имеет более сложную схему.

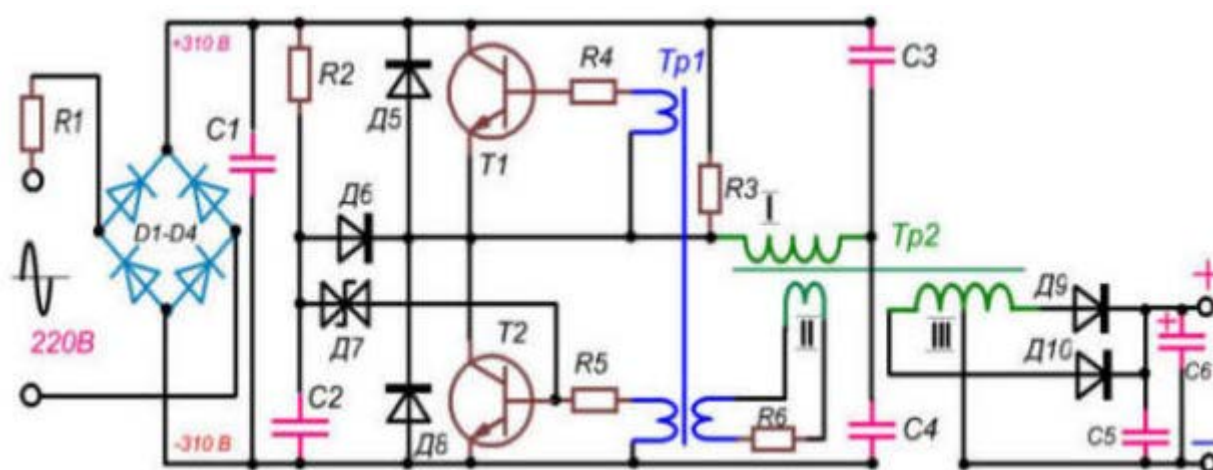


Рис.4. Двухтактная схема AC-DC преобразователя

Добавляется:

- устройство автоматического запуска генератора импульсов: R2, C2, Д6, Д7;
- еще один ключевой транзистор;
- дополнительный трансформатор Tr1, для управления ключевыми транзисторами;
- два конденсатора полумоста (C3, C4) для создания средней точки питания;
- два диода (Д5, Д8) для защиты транзисторов от пробоя.

Двухтактная схема ИБП имеет ряд преимуществ перед однотактной схемой:

- ферритовый сердечник выходного трансформатора Tr2 работает с активным перемагничиванием (наиболее полно используется магнитный сердечник по мощности), это снижает вес, габариты и стоимость;
- напряжение коллектор – эмиттер  $U_{ЭК}$  на каждом транзисторе не превышает напряжение источника питания 310 вольт;
- при изменении тока нагрузки от  $I = 0$  до  $I_{max}$ , выходное напряжение изменяется незначительно;
- выбросы высокого напряжения в первичной обмотке очень малы, соответственно меньше уровень излучаемых помех

Несмотря на повышенную сложность двухтактная схема, в сравнении с однотактной, имеет лучшие параметры, проще в настройке и эксплуатации. По такой схеме обычно собраны электронные трансформаторы для 12-вольтовых галогенных ламп, зарядные устройства средней мощности и другие устройства.



Выпускают большое количество специализированных микросхем преобразователей разных типов для различных применений: в блоках питания компьютеров, телевизоров, в светодиодных лампах, сварочных инверторах, автомобильной электронике и т.д.

### Зарядные устройства электромобилей

Зарядные устройства электромобилей делятся на бортовые и стационарные. Бортовые зарядные устройства монтируют на борту электромобилей и подзаряжаемых гибридных автомобилей. Они, как правило, рассчитаны на подключение к бытовой однофазной сети переменного тока напряжением 220 – 230В (в США еще и 115В), они обеспечивают медленную зарядку, поскольку ток в бытовой сети ограничен (не более 16 – 40А). Стационарные зарядные станции обеспечивают быструю (0,5 – 2 часа) зарядку постоянным током напряжением около 400В мощностью до 50 кВт на автомобиль.

Вначале рассмотрим бортовые зарядные устройства. Функциональная схема бортового зарядного устройства приведена на рис.5.

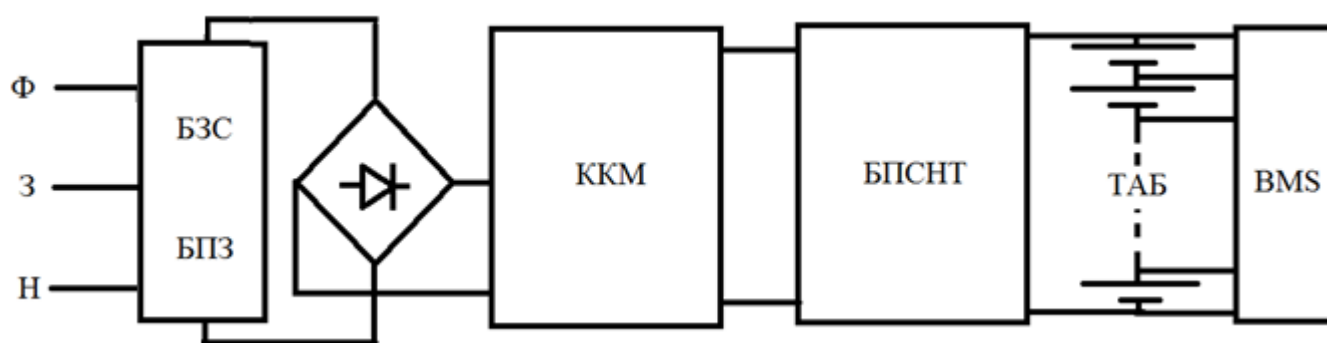


Рис.5. Функциональная схема бортового зарядного устройства

От сети к электромобилю подключают три провода, это фаза Ф, ноль Н и заземление З. Они подсоединены к БЗС БПЗ, который выполняет функции двух блоков – блока защиты сети (БЗС) и блока проверки заземления (БПЗ). БПЗ проверяет потенциал провода З относительно Ф и Н, без нагрузки и с нагрузкой. Если результат проверки показывает отсутствие правильного заземления, БПЗ не позволяет

производить зарядку. БЗС проверяет падение напряжения при подключении нагрузки, ограничивая ток заряда значением, безопасным для сети. Далее напряжение сети подается на мост выпрямителя. Выпрямитель работающий на конденсатор или на зарядку аккумулятора имеет низкий коэффициент мощности, недопустимый для сети с мощной нагрузкой, из-за того, что энергия берется только на вершинах синусоиды, из-за чего возникает большая мощность высших гармоник, которая бесполезно греет сетевые провода. Чтобы энергию брать по всей синусоиде, после выпрямителя включен корректор коэффициента мощности (ККМ). ККМ представляет собой повышающий преобразователь, работающий согласно описанию к схеме на рис.2. В результате после ККМ пульсирующее напряжение, взятое после моста, повышается до стабильного постоянного напряжения вблизи 400В. Из этого напряжения в блоке преобразования и стабилизации напряжения и тока (БПСНТ) формируется вначале только требуемый ток, и, затем, когда будет достигнуто максимальное зарядное напряжение тягового аккумулятора (ТАБ), стабилизируется только это напряжение. К блоку БПСНТ подключена ТАБ, а к ТАБ система контроля и выравнивания заряда на каждой банке аккумулятора, на рис.5 эта система обозначена BMS (Battery Management System).

Стационарные зарядные устройства (станции) для быстрой зарядки имеют обязательно подключение к сети, рассчитанное на большую мощность, часто по высоковольтной линии. Они имеют трехфазный 6-пульсовый или 12-пульсовый выпрямитель, пассивный или активный ККМ. Далее постоянное напряжение (около 400В) по проводу большого сечения подается к электромобилю. Кроме этого есть еще тонкие сигнальные провода, по которым происходит обмен информацией между зарядной станцией и электромобилем.

### **Инверторы вентильных электродвигателей**

Вентильные электродвигатели (ВЭД) широко применяются в качестве тяговых электродвигателей в электромобилях, гибридных автомобилях, гольфкарах, электрических мотоциклах, электрических велосипедах и других электрических транспортных средствах. Элементы силовой электроники являются важной составной частью такого инвертора.

Вентильный электродвигатель (ВЭД), как показано на рис.5, состоит из синхронной электрической машины (СЭМ) с датчиками положения ротора S1, S2, S3 и инвертора ВЭД. В состав инвертора входит контроллер ВЭД, формирующий управляющие сигналы для управляемого трехфазного моста и собственно управляемого моста. Входными сигналами для контроллера ВЭД являются сигналы от датчиков положения ротора СЭМ - S1, S2 и S3.

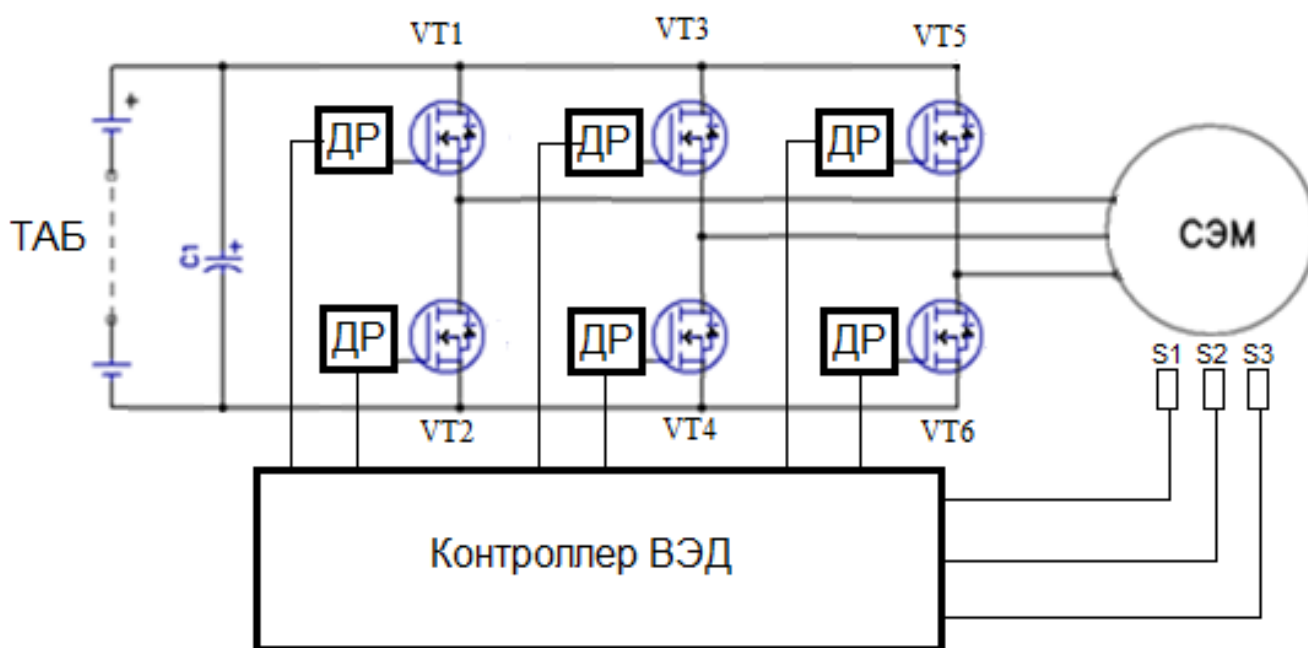


Рис.5. Функциональная схема вентильного электродвигателя

Управляемый трехфазный мост состоит из 6 силовых ключей VT1 – VT6 и 6 драйверов силовых ключей ДР, причем драйверы ключей VT1, VT3 и VT5 это драйверы верхнего ключа, а драйверы ключей VT2, VT4 и VT6 это драйверы нижнего ключа. На рис.5 также есть ТАБ и конденсатор С1, отсекающий индуктивность силовых соединительных проводов.

### **Направления развития силового электронного оборудования автомобилей**

В автомобилях с двигателями внутреннего сгорания силовые электронные ключи широко применяют в системе зажигания и при управлении соленоидами форсунок. Эти ключи постоянно совершенствуются в направлении снижения потерь,

повышения быстродействия, повышения надежности. Также ведутся работы по замене различных механических выключателей и переключателей, а также механических реле электронными ключами, что обеспечивает кроме повышения надежности и экономии меди еще и возможность широкого применения микропроцессорного управления различными устройствами и системами автомобиля, в том числе и дистанционного управления.

В электромобилях и гибридных автомобилях постоянно совершенствуются системы управления тяговыми электродвигателями и их силовая электроника с целью повышения их КПД и повышения их адаптивности к переменным нагрузкам. Большое распространение получает векторное управление как синхронными, так и асинхронными электрическими машинами в тяговом электроприводе, которое способствует не только достижению этих целей, но и повышению экономичности, мощности, снижению веса и габаритов.

Большие перспективы применения силовой электроники в зарядных станциях для электромобилей с использованием солнечных батарей, особенно в коттеджных строениях с солнечными панелями на крышах. При этом ТАБ электромобиля не только может быть приемником избыточной электроэнергии, но и источником электрической энергии, когда есть перебои в электроснабжении или просто, когда есть избыточная энергия в ТАБ.