

## Лекція № 6

### Тема № 4: Автоматизований електропривод з спеціальними двигунами

1. Электропривод с вентильным двигателем.
2. Гибридный силовой агрегат THS II (Toyota Hybrid System II).
3. Управление питанием машин MG1 и MG2.
4. Работа инвертера.
5. Работа преобразователя напряжения

#### 1. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

**Вентильным (ВД)** называется синхронный двигатель с электронным коммутатором напряжения, к которому подключена обмотка статора СД, и датчиком положения ротора, установленным на валу двигателя и управляющего работой коммутатора в зависимости от положения ротора. Датчик положения ротора генерирует периодические сигналы, по которым открываются и закрываются ключи коммутатора, подключающего к сети соответствующие обмотки статора. В результате этого магнитное поле статора вращается с той же средней скоростью, что и ротор.

Рассмотрим принцип действия ВД на примере однофазного СД (рис. 6.1), ротор 4 которого представляет собой постоянный магнит  $N-S$  с датчиком 8 положения на валу. Управляемый коммутатор выполнен на четырех управляемых ключах 1, 2 и 6, 7 и связан с источником постоянного напряжения  $U$ . Обмотка статора СД на схеме для упрощения анализа представлена двумя проводниками 3 и 5. Рассмотрим работу схемы, предположив, что управляемые ключи могут открываться и закрываться по сигналам с датчика 8 в любой последовательности и на любую длительность.

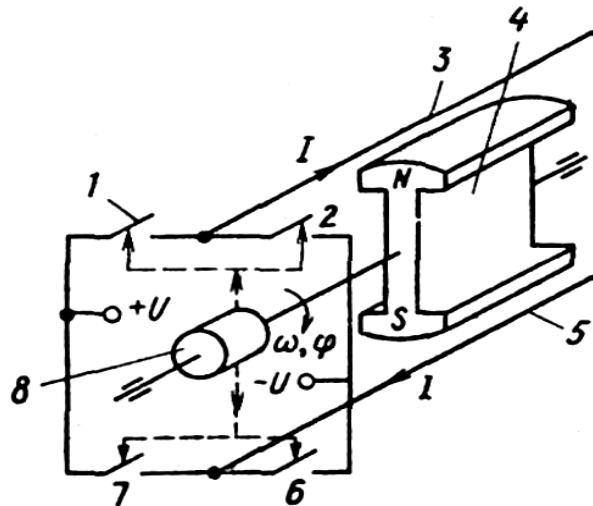


Рис. 6.1. Упрощенная схема вентильного двигателя

Для протекания по проводникам 3 и 5 тока  $I$  в указанном направлении должны быть замкнуты ключи 1 и 6. В результате взаимодействия магнитного поля ротора с током  $I$  в проводниках 3 и 5 на ротор действует вращающий момент, поворачивающий его в соответствии с *правилом левой руки* по часовой стрелке. После поворота ротора на  $180^\circ$  (половину оборота) для сохранения того же направления вращающего момента на валу направление тока в проводниках 3 и 5 должно быть изменено на противоположное. Для этого с датчика 8 поступает команда на размыкание ключей 1 и 6 и замыкание ключей 2 и 7, что и приводит к изменению тока в проводниках обмотки статора и сохранению

прежнего направления вращающего момента двигателя. После поворота ротора еще на  $180^\circ$  по сигналу с датчика 8 замыкаются ключи 1 и 6 и размыкаются ключи 2 и 7 и т. д. Таким образом, по сигналам с датчика 8 положения ротора с помощью управляемых ключей происходит коммутация тока в обмотке статора, чем обеспечивается постоянное направление вращающего момента двигателя при любой скорости его вращения.

Нетрудно заметить, что ВД по принципу своего действия аналогичен двигателю постоянного тока, у которого обмотка возбуждения (или постоянные магниты) находится на роторе (вращающейся части). Преимущество ВД при этом состоит в том, что у него нет механического коллекторно-щеточного узла и поэтому он является полностью бесконтактным двигателем при возбуждении от постоянных магнитов или требуется установка двух контактных колец при использовании обмотки возбуждения.

Совпадение принципов действия двигателя постоянного тока и ВД определяет схожесть их механических характеристик.

Регулирование скорости ВД может осуществляться за счет изменения напряжения и тока возбуждения (при наличии обмотки возбуждения).

ВД по своей конструкции аналогичен синхронному. На статоре двигателя располагается трехфазная обмотка переменного тока, питаемая от вентильного коммутатора. Ротор обеспечивает возбуждение двигателя и может иметь два конструктивных исполнения – в виде постоянного магнита или с обмоткой возбуждения, питаемой от источника постоянного тока через контактные кольца и щетки.

Двигатели с возбуждением от постоянных магнитов выполняются на мощности до 50 кВт обычно в многополюсном исполнении. В этом диапазоне мощности двигатели с постоянными магнитами имеют меньшие габариты и массу и более высокий КПД по сравнению с двигателями, имеющими обмотку возбуждения.

В ВД средней и большой мощности обычно используются СД обычной конструкции с обмоткой возбуждения, расположенной на роторе.

В последнее время в ВД мощностью от 30 до 200 кВт стали использоваться бесконтактные СД с обмоткой возбуждения, специальным образом располагаемой на статоре вместе с трехфазной обмоткой. Ротор в этом случае представляет собой безобмоточное зубчатое колесо (зубчатку), через зубцы которого замыкается магнитный поток, создаваемый обмотками возбуждения и переменного тока. Ротор вращается синхронно с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой. Обмотка возбуждения усиливает магнитный поток и тем самым увеличивает вращающий момент двигателя.

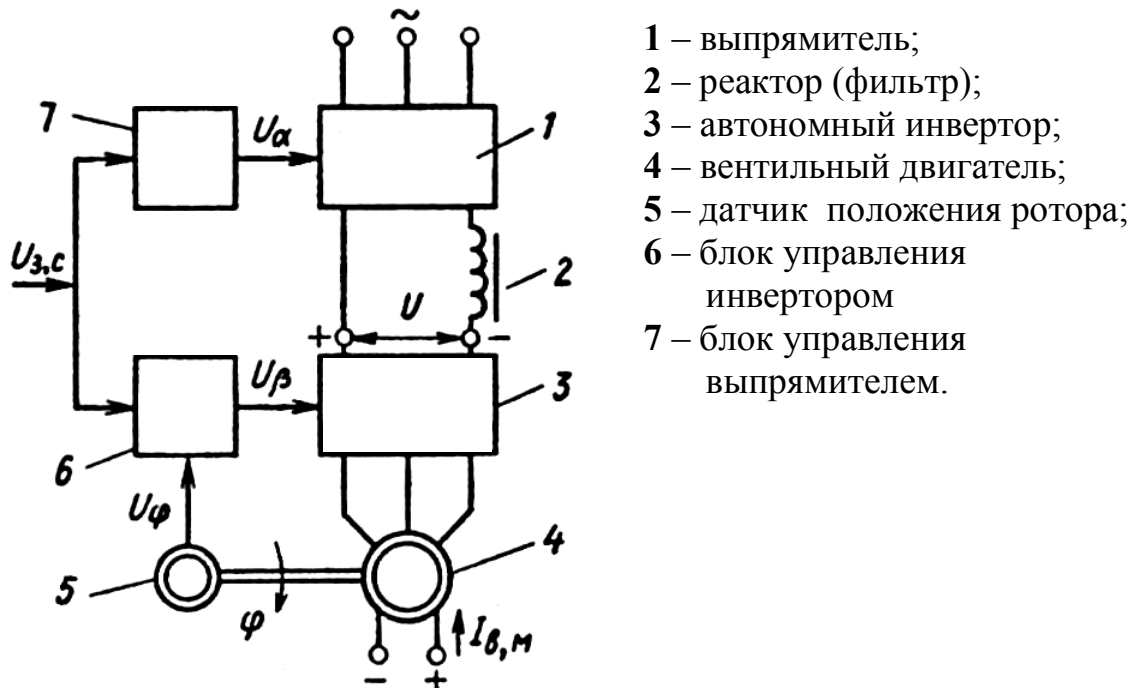
Коммутатор в схеме ВД представляет собой по принципу своего действия управляемый инвертор, который может питаться непосредственно от источника постоянного тока (сети постоянного тока, аккумуляторной батареи) или от управляемого выпрямителя, если ВД подключается к сети переменного тока. Во втором случае коммутатор представляет собой преобразователь частоты со звеном постоянного тока.

В тиристорных преобразователях частоты коммутация тока в вентилях может быть естественной или искусственной. Естественная коммутация тиристоров используется в тех случаях, когда нагрузка инвертора (трехфазная обмотка СД) содержит источник ЭДС той же частоты, что и выходное напряжение инвертора. При этом благодаря действию этой ЭДС осуществляется коммутация вентиля, получившая название естественной.

Естественная коммутация вентиля, позволяющая использовать простой по схеме инвертор, может быть осуществлена только при сравнительно большой ЭДС двигателя, когда его скорость не ниже 10% номинальной. В связи с этим пуск ВД затруднен и требуется применение специальных мер для устранения этого недостатка.

***Инвертор с искусственной коммутацией вентиля*** – это преобразователь посто-

янного напряжения или тока в переменный с принудительной коммутацией вентилей, вследствие чего его работа практически не зависит от характера и режима нагрузки. При использовании искусственной коммутации (рис. 6.2) устраняются трудности при пуске ВД, характерные для инверторов с естественной коммутацией.



- 1 – выпрямитель;
- 2 – реактор (фильтр);
- 3 – автономный инвертор;
- 4 – вентильный двигатель;
- 5 – датчик положения ротора;
- 6 – блок управления инвертором
- 7 – блок управления выпрямителем.

Рис. 6.2. Схема ВД с искусственной коммутацией вентилей инвертора

Регулирование скорости вентильного двигателя 4 может производиться за счет изменения напряжения на выходе выпрямителя 1 с помощью сигнала  $U_\alpha$  от блока 7 управления выпрямителем, угла управления тиристорами автономного инвертора 3 (сигнал  $U_\beta$  выхода блока 6 управления инвертором) и тока возбуждения  $I_{в,м}$ . Уровень скорости в первых двух случаях определяется задающим сигналом  $U_{з,с}$ . Датчик 5 положения ротора обеспечивает посредством сигнала  $U_\varphi$ , пропорционального положению ротора двигателя, требуемую коммутацию тиристоров инвертора 3. Реактор 2, включенный между выпрямителем 1 и инвертором 3, выполняет роль фильтра.

Проблема пуска ВД не возникает также при использовании преобразователей частоты с непосредственной связью. В этих преобразователях коммутация вентилей осуществляется естественным путем при переходе сетевого напряжения через нуль. Однако, как отмечалось выше, преобразователи частоты с непосредственной связью обладают ограниченными регулировочными возможностями.

Для получения высокого качества регулирования координат в статических и динамических режимах в ЭП с ВД используются различные обратные связи.

## 2. ГИБРИДНЫЙ СИЛОВОЙ АГРЕГАТ THS II (Toyota Hybrid System II)

### Устройство основных компонентов

#### 2.1. MG1 (Мотор-генератор №1) и MG2 (Мотор-генератор №2)

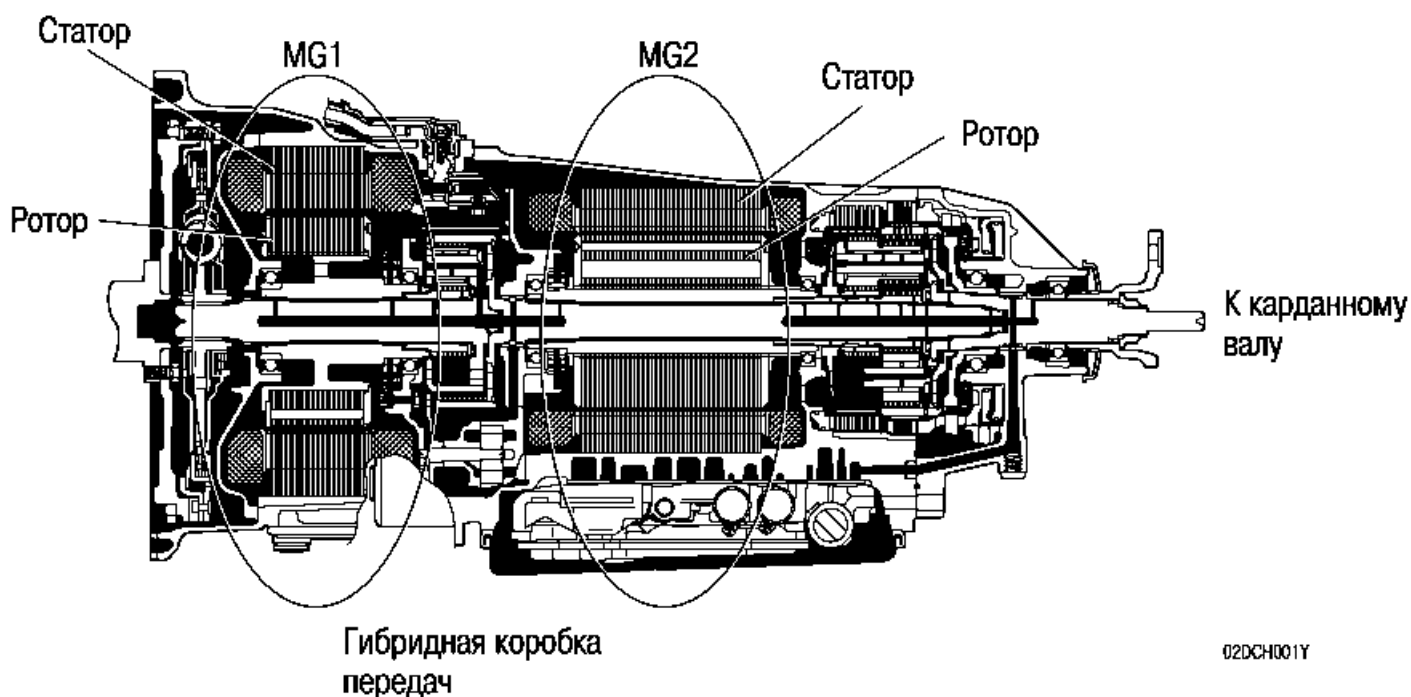
И MG1 и MG2 представляют собой компактные и высокоэффективные синхронные электрические машины переменного тока с постоянными магнитами.

В MG1 и MG2 применяется ротор с V-образным магнитом большой мощности, который повышает тормозной момент электрической машины. В статоре применяется сердечник из электротехнической стали с низкими активными потерями и обмотка с высоковольтной изоляцией. Это позволяет MG1 и MG2 развивать высокую мощность и крутящий момент при небольших размерах.

Электродвигатель, служащий источником вспомогательного крутящего момента, способствует достижению автомобилем прекрасных динамических качеств, включая плавность трогания и ускорения. Работая в составе рекуперативного тормоза, MG2 преобразует кинетическую энергию автомобиля в электрическую энергию, которая накапливается в высоковольтной аккумуляторной батарее.

MG1 предназначен для зарядки высоковольтной батареи и для питания MG2. Кроме того, MG1 используется как стартер для двигателя внутреннего сгорания.

MG1 и MG2 охлаждаются принудительно, при помощи жидкостной системы охлаждения с циркуляционным насосом.



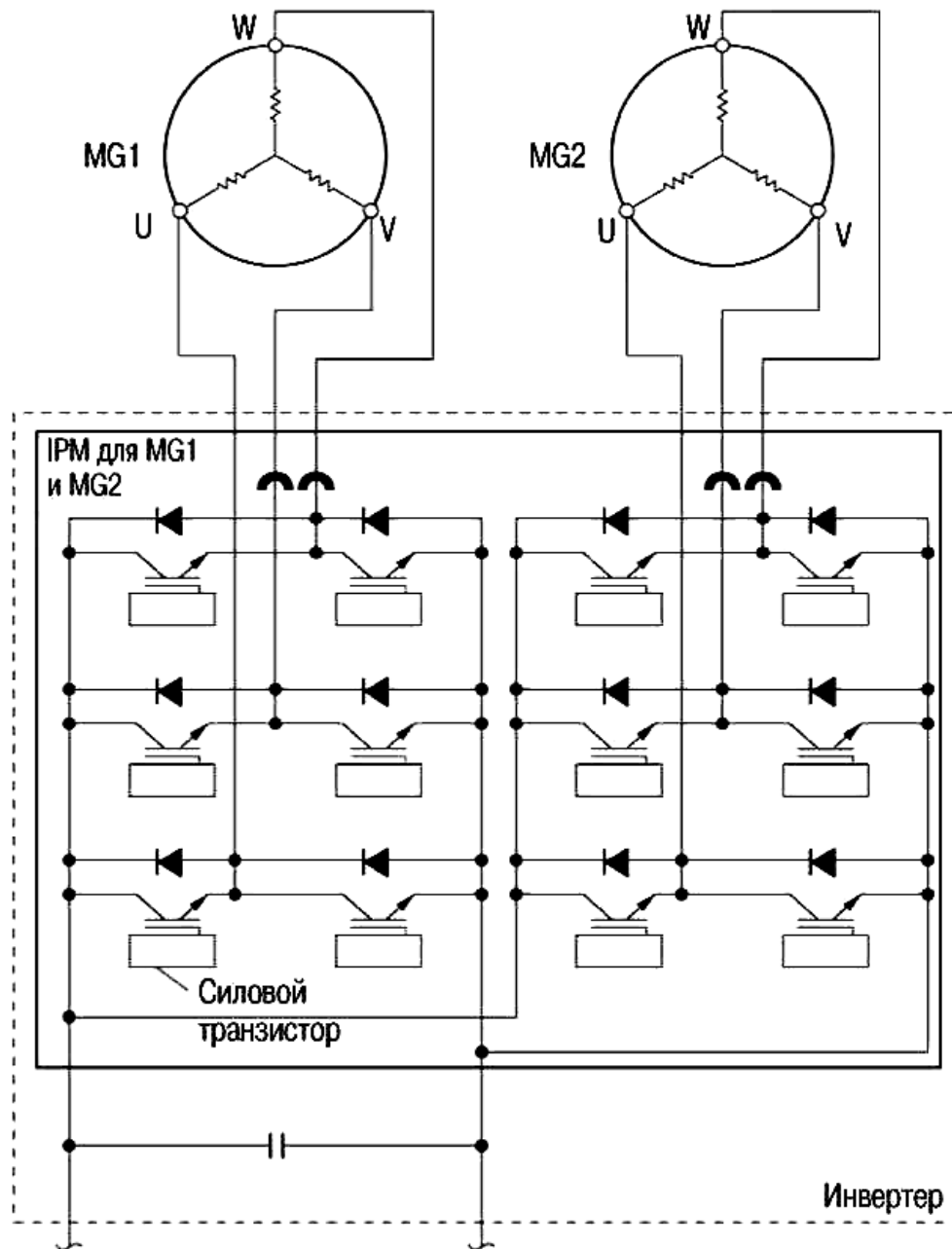
### Технические данные MG1

Тип	Электродвигатель с магнитами постоянного тока
Назначение	Генератор, стартер
Максимальное рабочее напряжение	650 В, постоянный ток
Система охлаждения	Жидкостная

### Технические данные MG2

Тип	Электродвигатель с магнитами постоянного тока
Назначение	Генератор, привод ведущих колес
Максимальное рабочее на-	650 В, постоянный ток
Максимальная мощность	147 кВт
Максимальный крутящий момент	275 Н·м
Система охлаждения	Жидкостная

## Схема системы



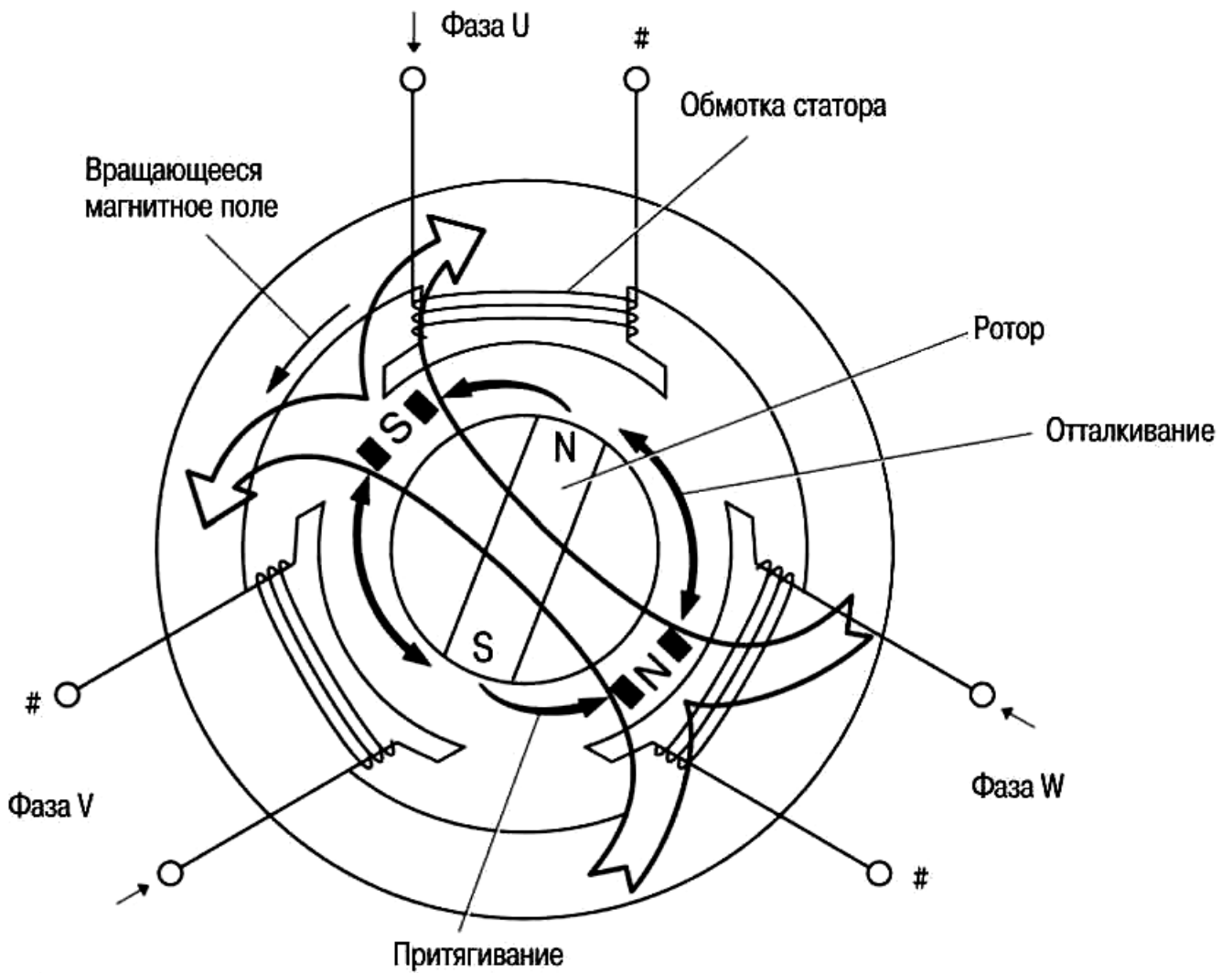
### Электродвигатель с магнитами постоянного тока

При подаче на трехфазную обмотку статора переменного напряжения в электродвигателе возникает вращающееся магнитное поле. Вращающееся поле статора взаимодействует с полюсами постоянных магнитов ротора и создает крутящий момент.

Крутящий момент можно считать практически пропорциональным силе тока, а скорость вращения ротора регулируется частотой переменного тока.

Оптимальное управление угловым смещением оси магнитов ротора и вращающимся магнитным полем статора позволяет получить на валу двигателя высокий полезный крутящий момент на всех скоростных режимах.

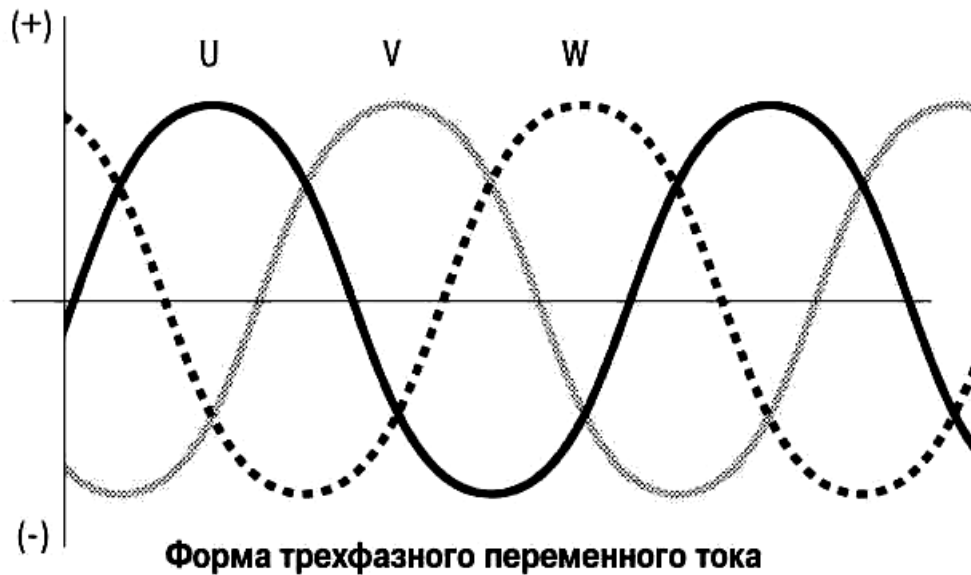
При переходе в режим генератора вращающееся магнитное поле ротора наводит ток в обмотке статора.



→ : От инвертера

# : Соединение внутри двигателя

182TH29



### Датчик скорости вращения (резольвер)

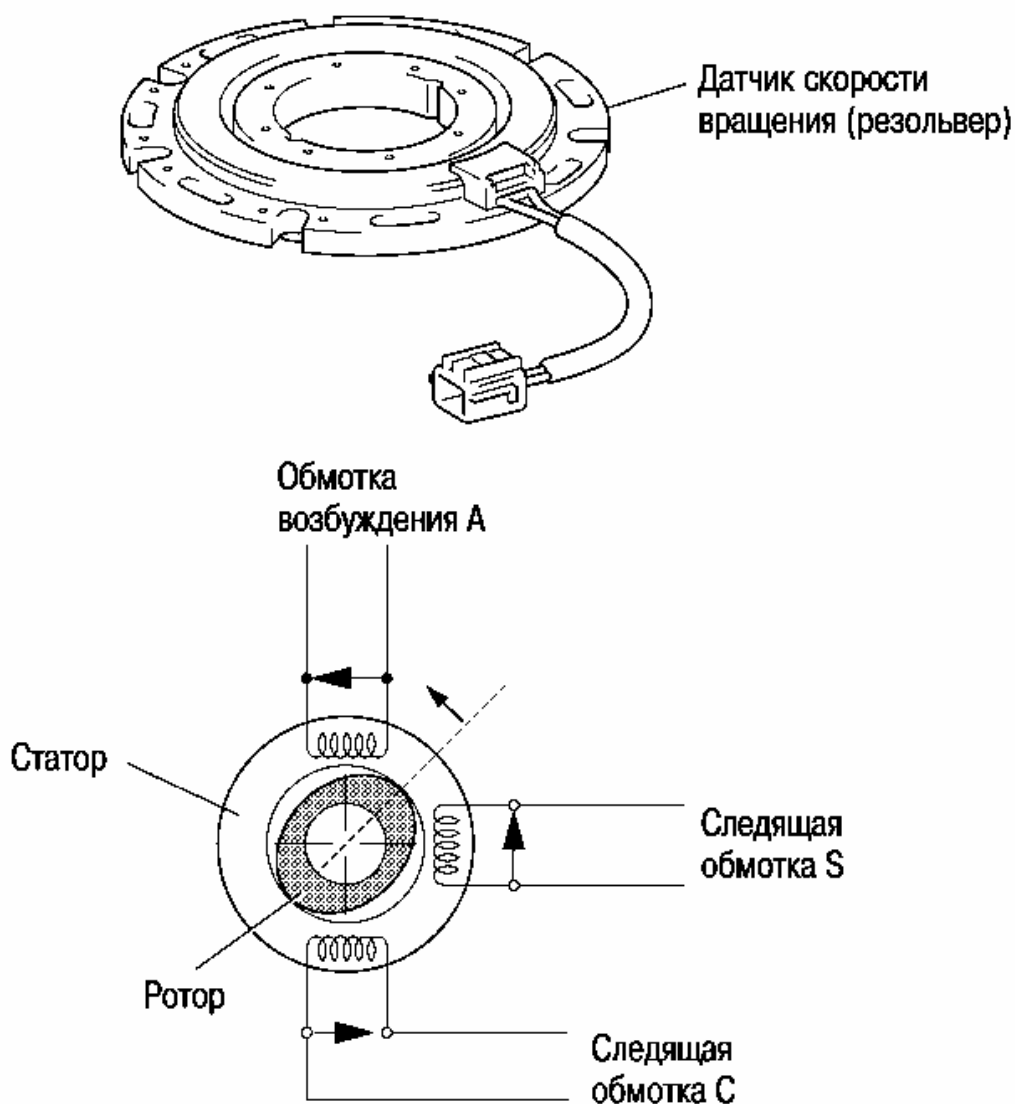
Этот компактный датчик точно определяет положение магнитных полюсов, что совершенно необходимо для реализации эффективного управления машинами MG1 и MG2.

В статоре датчик расположены три различные обмотки: Обмотка возбуждения *A*, следящая обмотка *S* и следящая обмотка *C*. Фазы обмоток *S* и *C* смещены относительно

друг друга на 90 градусов.

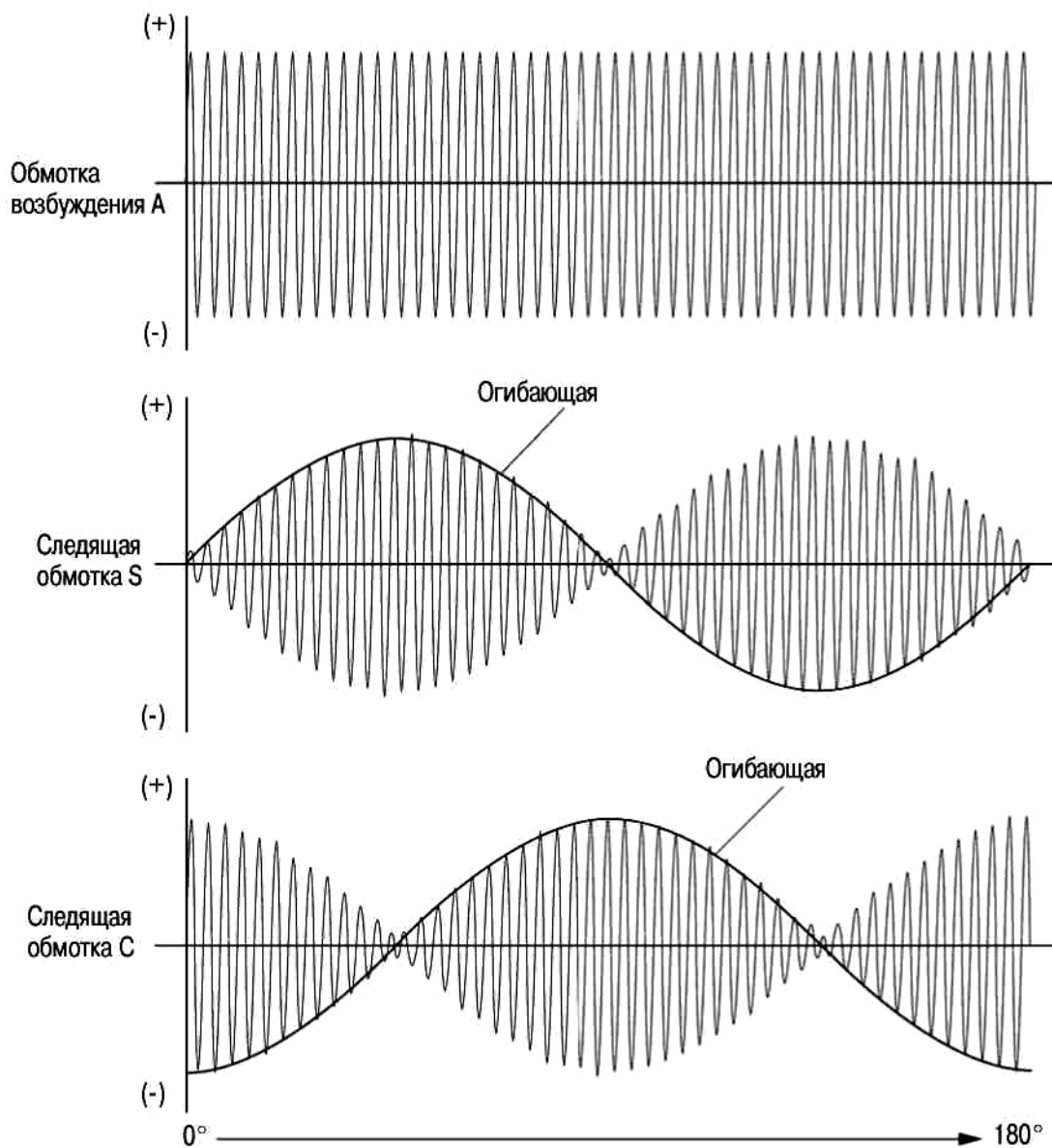
Ротор имеет овальную форму, поэтому при его вращении зазор между ротором и статором меняется.

Переменный ток, подаваемый в обмотку возбуждения *A* преобразуется в сигналы постоянной частоты. В следящих обмотках *S* и *C* формируются сигналы, соответствующие угловому положению ротора. Контроллер MG определяет абсолютное угловое положение ротора по разности сигналов в обмотках *S* и *C*. Кроме того, контроллер MG вычисляет скорость вращения ротора по скорости изменения его положения.



Контроллер MG постоянно отслеживает пики сигналов и строит по ним виртуальную огибающую кривую. Контроллер MG вычисляет абсолютное положение ротора по разности сигналов обмоток слежения *S* и *C*. Направление вращения ротора определяется по разности фаз двух огибающих кривых. Скорость вращения определяется по величине изменения положения ротора за определенный промежуток времени.

На графиках ниже показаны формы сигналов в обмотках *A*, *S*, и *C* за угол поворота ротора в положительном направлении на 180° из определенного положения.



## 2.2. Блок инвертера

### Общие сведения

Инвертер преобразует постоянное напряжение высоковольтной батареи в трехфазное переменное напряжение питания электрических машин MG1 и MG2.

Работой силовых транзисторов управляет контроллер цепи высокого напряжения через контроллер MG. Кроме того, инвертер передает через контроллер MG контроллеру цепи высокого напряжения сведения необходимые для регулирования питания (сила тока, напряжение).

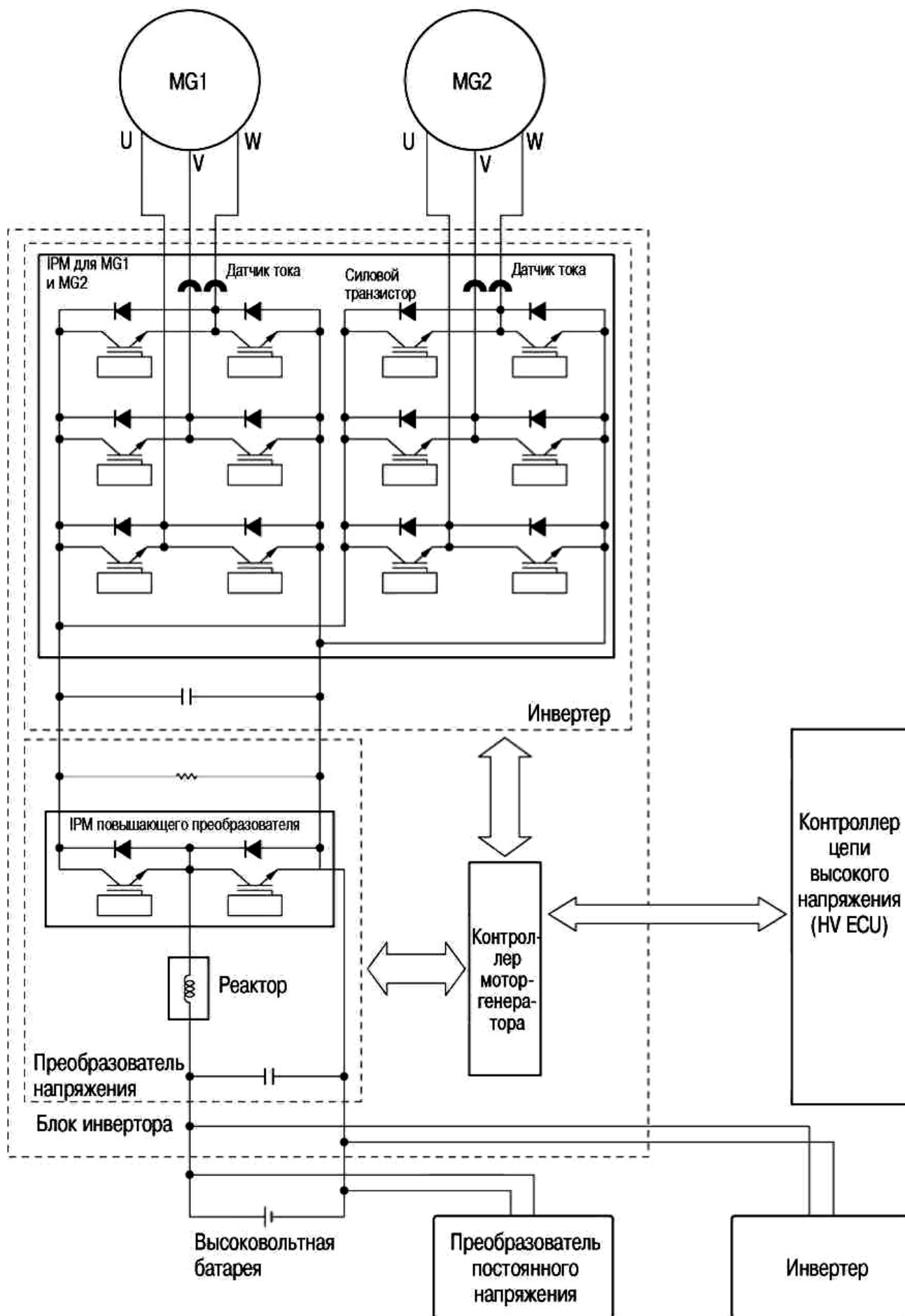
Инвертер и электрические машины MG1 и MG2 охлаждаются системой охлаждения с радиатором, которая независима от системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания.

В составе инвертера имеется повышающий преобразователь постоянного напряжения, который поднимает напряжение высоковольтной батареи 288 В до 650 В. После повышения постоянного напряжения оно преобразуется в переменное напряжение.

В каждом плече моста, питающего MG1 и MG2, находятся силовые транзисторы. Кроме того, в компактном интеллектуальном силовом блоке (IPM) установлен процес-



сор, предназначенный для обработки сигналов и реализации защитных функций.



### **2.3. Повышающий преобразователь напряжения**

Преобразователь напряжения повышает постоянное напряжение высоковольтной батареи с 288 В до 650 В. В состав преобразователя напряжения входит интегральный силовой блок (IPM), в котором находится переключающий биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT) и реактор, служащий накопителем энергии. Перечисленные компоненты используются для повышения постоянного напряжения. Более подробно работа повышающего преобразователя напряжения изложена на стр. ТН-47.

Когда MG1 или MG2 работают в режиме генератора, инвертер преобразует вырабатываемое переменное напряжение в постоянное напряжение 650 В. Затем преобразователь постоянного тока понижает это напряжение до 288 В, которое используется для зарядки высоковольтной аккумуляторной батареи.

### **2.4. Контроллер MG (мотор-генератора)**

Контроллер MG находится в блоке инвертера. Контроллер MG управляет работой инвертера и преобразователя напряжения, чтобы обеспечить работу MG1 или MG2 в режиме генератора или двигателя.

Контроллер MG передает на контроллер цепи высокого напряжения сведения, необходимые для управления автомобилем, такие как, сила тока на выходе инвертера, температура инвертера и возникшие неисправности. Контроллер MG принимает от контроллера цепи высокого напряжения сведения, нужные для управления мотор-генератором, такие как, необходимое значение крутящего момента.

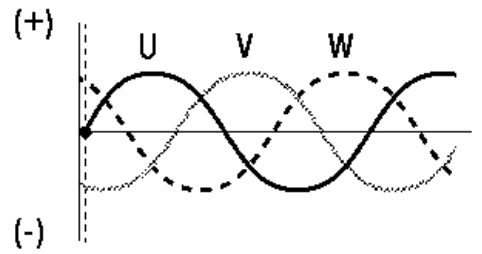
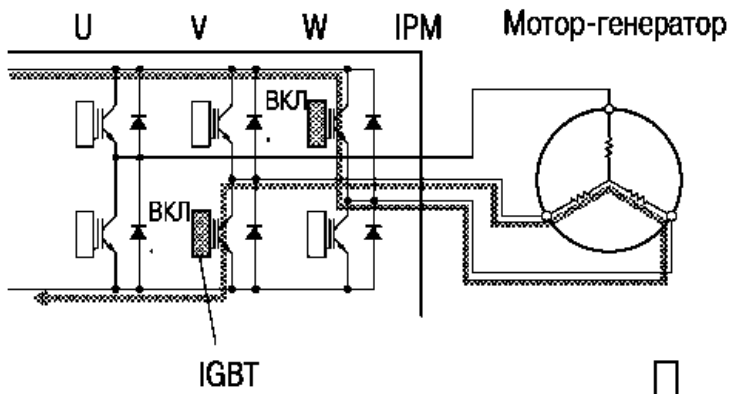
## **3. УПРАВЛЕНИЕ ПИТАНИЕМ МАШИН MG1 И MG2**

Для создания тягового усилия контроллер MG, по команде контроллера цепи высокого напряжения, управляет работой MG1 и MG2, используя интеллектуальный силовой блок (IPM). Шесть биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) включают и выключают отдельные мотор-генераторы в режиме генерирования или создания тягового усилия.

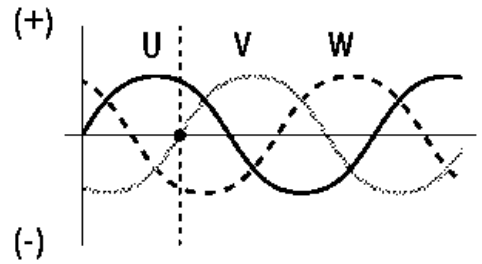
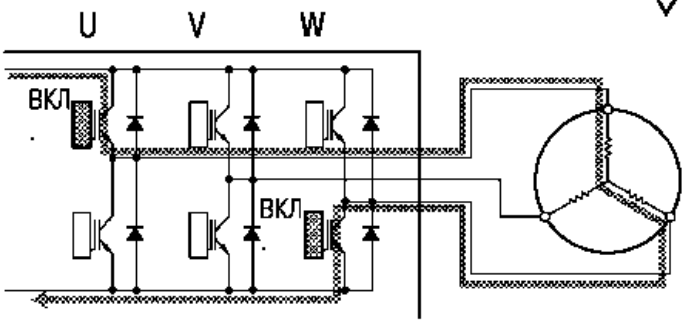
### **Работа в тяговом режиме**

На рисунке внизу показан принцип управления работой мотор-генератора. Биполярные транзисторы, расположенные в интеллектуальном силовом блоке, включают и выключают питание трех фаз мотор-генераторов.

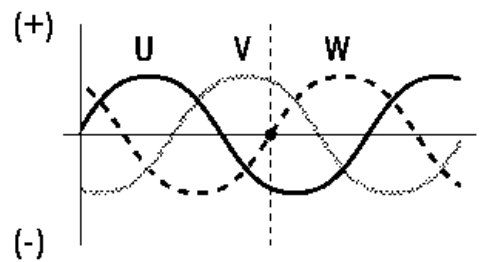
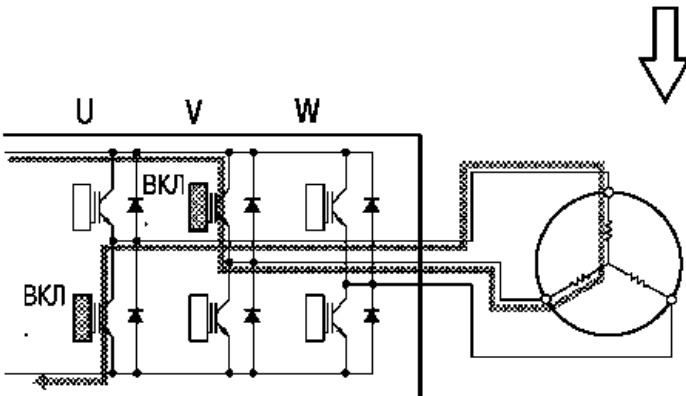
Чтобы создать тяговое усилие нужной величины, контроллер MG включает и выключает транзисторы, регулируя этим скорость вращения.



02DTH76Y

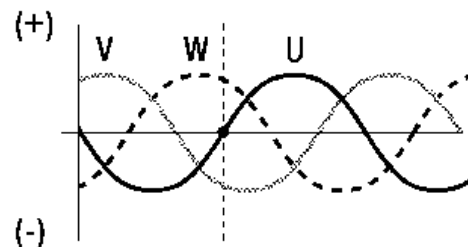
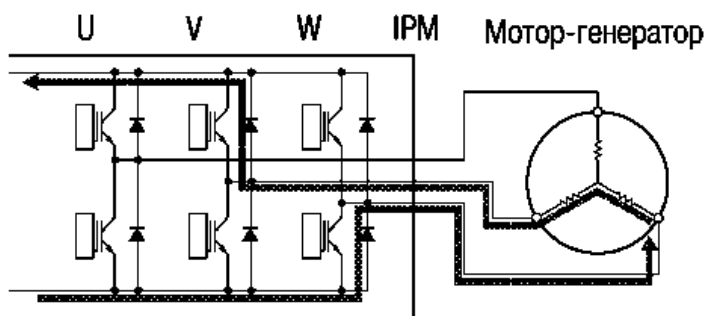


02DTH77Y

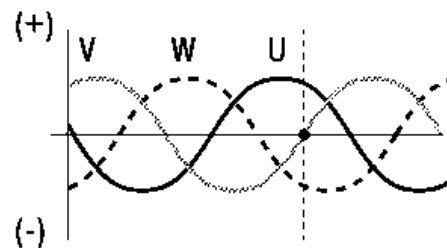
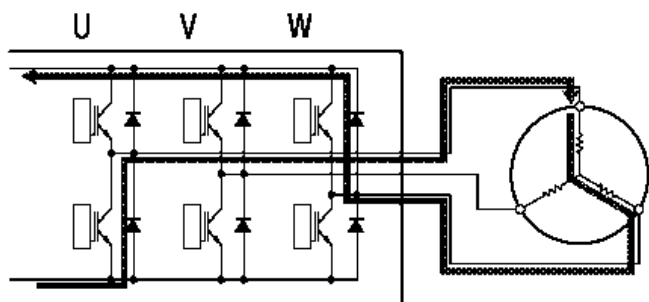


### Работа в режиме генерации

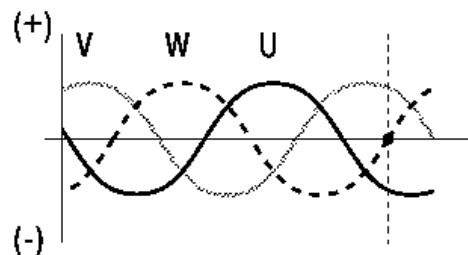
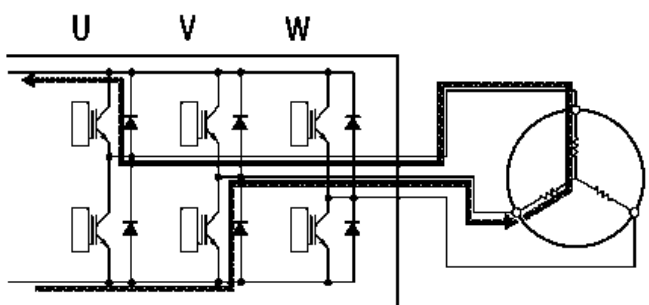
На рисунке внизу показан принцип управления мотор-генераторами в режиме генерации. Ток, который последовательно генерируется в каждой из трех фаз мотор-генератора, приводимого в движение колесами автомобиля, используется для зарядки высоковольтной батареи или для питания другого мотор-генератора.



02DTH79Y



02DTH80Y



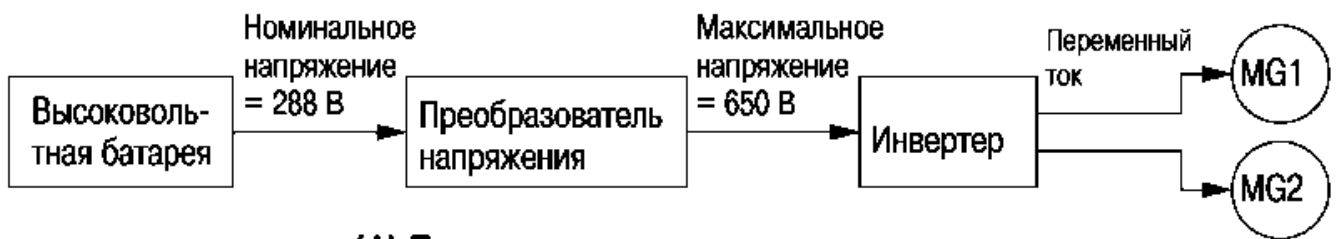
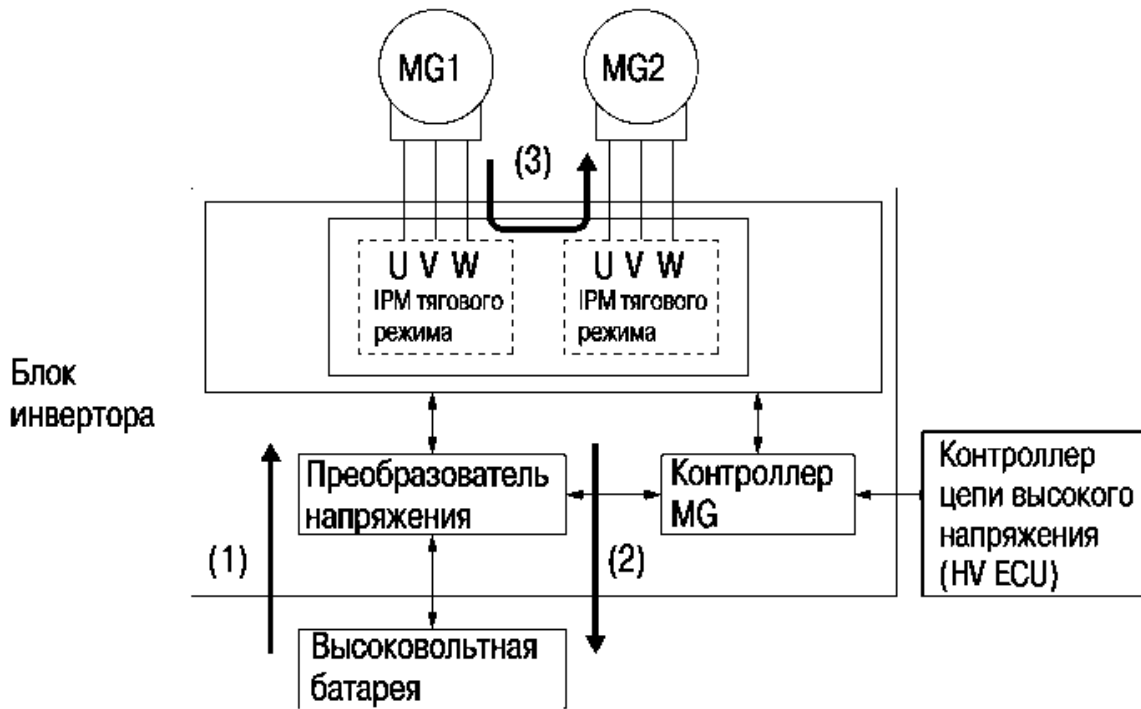
#### 4. РАБОТА ИНВЕРТЕРА

Инвертер преобразует постоянное напряжение высоковольтной батареи в переменное напряжение для питания MG1 и MG2 или вырабатываемое переменное напряжение в постоянное для зарядки батареи. Инвертером управляет контроллер цепи высокого напряжения через контроллер MG. Кроме того, инвертер передает переменный ток от MG1 на MG2. Однако передаваемый от MG1 на MG2 переменный ток проходит внутри инвертера через преобразование в постоянный ток.

Контроллер цепи высокого напряжения, при помощи контроллера MG, передает на силовой транзистор инвертера сигнал включения фаз U, V, и W обмотки статоров MG1 и MG2. Сигнал передается в соответствии со сведениями о положении роторов MG1 и MG2 и уровне зарядки высоковольтной батареи (сведения приходят, соответственно, от мотор-генераторов и датчика состояния высоковольтной батареи).

В том случае, когда селектор ставится в положение N или контроллер цепи высокого напряжения получает от инвертера сигнал перегрева или превышения мощности по току или по напряжению, контроллер цепи высокого напряжения передает на инвертер

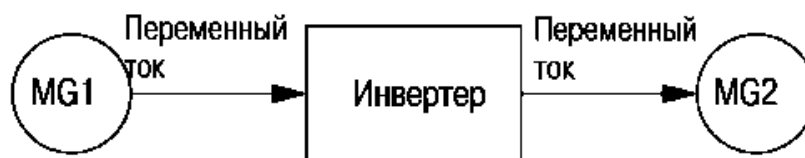
сигнал выключения MG1 и MG2.



**(1) Повышение постоянного напряжения**



**(2) Понижение постоянного напряжения**



**(3) Подача питания**

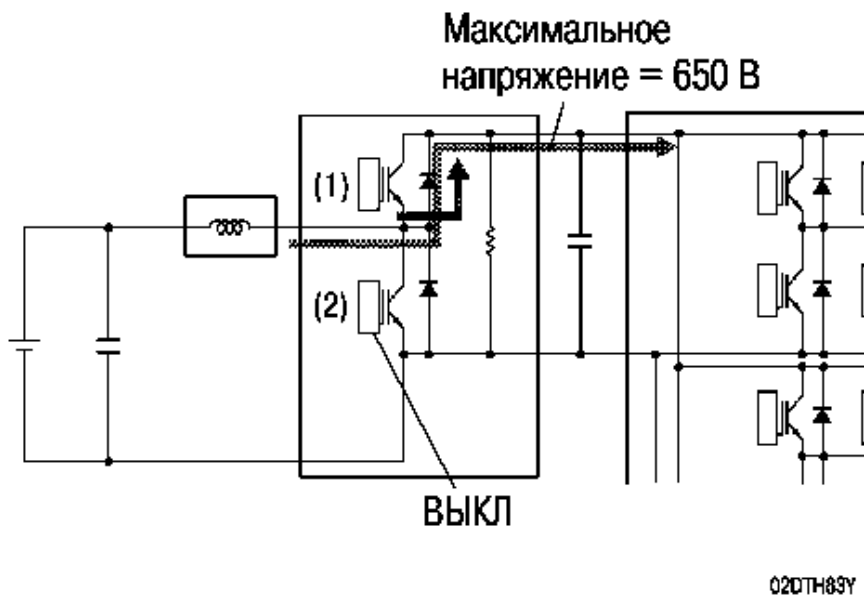
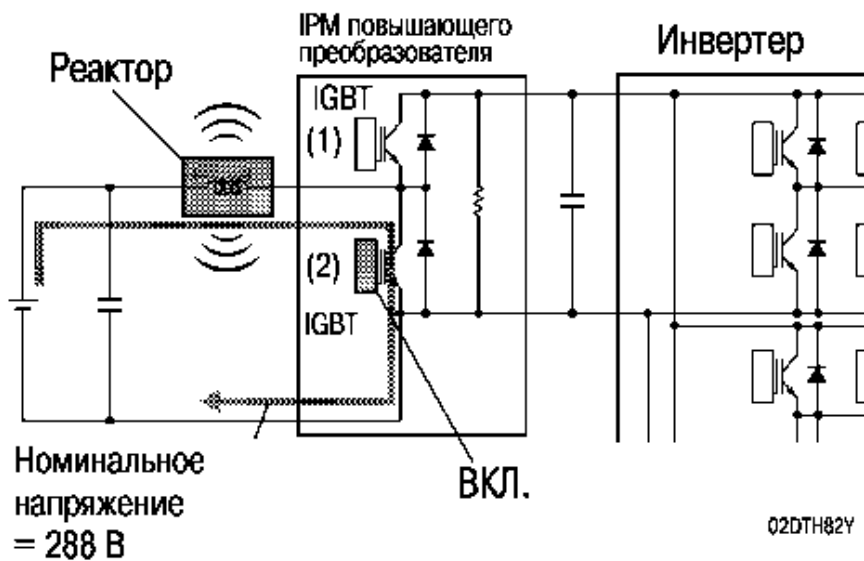
## 5. РАБОТА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Преобразователь постоянного напряжения, по команде контроллера цепи высокого напряжения, через контроллер МG, повышает номинальное напряжение высоковольтной батареи с 288 В до максимального значения 650 В.

Инвертер преобразует переменное напряжение, вырабатываемое МG1 или МG2, в постоянное напряжение. Преобразователь постоянного напряжения, по команде контроллера цепи высокого напряжения, через контроллер МG, понижает максимальное напряжение с 650 В до номинального напряжения 288 В (для зарядки высоковольтной батареи).

Основными компонентами преобразователя постоянного напряжения являются интегрированный силовой модуль (IPM) с биполярными транзисторами (IGBT), которые выполняют функцию переключателей, и реактор, накапливающий и отдающий энергию.

### Повышение напряжения



Повышение номинального постоянного напряжения 288 В до максимального по-

стоянного напряжения 650 В происходит следующим образом. При включении IGBT (2) высоковольтная батарея (номинальное напряжение 288 В) отдает энергию в реактор. В результате начинает увеличиваться напряжение на реакторе. Когда напряжение на реакторе увеличивается до 650 В транзистор IGBT (2) выключается и возникает э.д.с. самоиндукции. Энергия, созданная при помощи ЭДС самоиндукции (при напряжении 650 В), поступает из реактора в инвертер.

### Понижение напряжения

Переменное напряжение, которое вырабатывается MG1 или MG2 для зарядки высоковольтной батареи, в инвертере преобразуется в постоянное напряжение 650 В. Затем преобразователь напряжения понижает его значение до 288 В. Снижение напряжения достигается широтно-импульсным модулированием, которое выполняет транзистор IGBT (1).

