

## АНАЛИЗ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

А. С. Гурский, Е. Л. Савич

*Белорусский национальный технический университет*

**Аннотация.** Развитие электромобилей является самым приоритетным направлением развития автотранспорта. Самым важным агрегатом электромобиля является электродвигатель и системы его питания и управления. Электродвигатели электромобилей постоянно совершенствуются с точки зрения потребления электроэнергии, надежности, снижения затрат на эксплуатацию. В предлагаемой статье рассматриваются современные электродвигатели, применяемые в электромобилях: традиционные синхронные, синхронные реактивные и асинхронные бесщеточные электродвигатели переменного трёхфазного тока. Приводятся их конструкции и принцип работы с поясняющими рисунками. Особое внимание уделяется синхронным реактивным электродвигателям с внутренним постоянным магнитом, применяемым в электродвигателях электромобилей фирмы Tesla. Анализируются преимущества и недостатки электродвигателей, применяемых в электромобилях.

**Ключевые слова:** электромобиль, электродвигатель, инвертер, аккумуляторная батарея, блок электропривода, постоянный магнит, трехфазный переменный ток, статор, ротор, обмотка, резольвер, синхронизация.

## ANALYSIS OF TRACTION ELECTRIC MOTORS OF ELECTRIC VEHICLES

A. S. Gursky, E. L. Savich

*Belarusian National Technical University*

**Abstract.** The development of electric vehicles is the highest priority in the development of motor transport. The most important unit of an electric vehicle is the electric motor and its power and control systems. Electric motors of electric vehicles are constantly being improved in terms of energy consumption, reliability, and lower operating costs. This article discusses modern electric motors used in electric vehicles: traditional synchronous, synchronous reluctance and asynchronous three-phase AC brushless motors. Their designs and the principle of operation with explanatory drawings are given. Particular attention is paid to synchronous reluctance motors with an internal permanent magnet, used in Tesla electric motors. The advantages and disadvantages of electric motors used in electric vehicles are analyzed.

**Keywords:** electric car, electric motor, inverter, storage battery, electric drive unit, permanent magnet, three-phase alternating current, stator, rotor, winding, resolver, synchronization.

В настоящее время в качестве электродвигателей электромобилей используются традиционные синхронные, синхронные реактивные и асинхронные бесщеточные электродвигатели переменного трёхфазного тока.

В бесщеточном электродвигателе электрическая энергия преобразовывается в механическую благодаря изменению полярности. В таких электродвигателях нужно подавать постоянное напряжение на обмотки статора в определенные интервалы времени, имитируя работу коллектора.

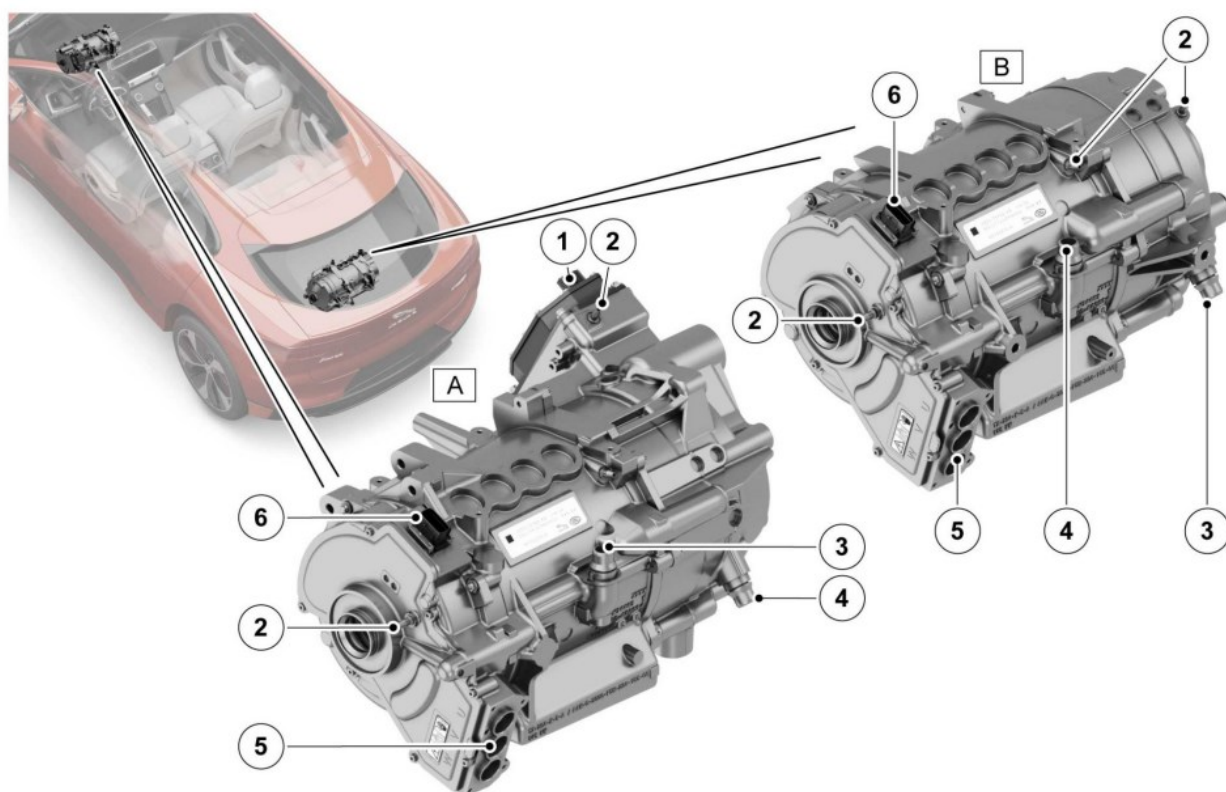
Для этого предусмотрены или блоки управления (коммутаторы) или эту роль выполняет инвертер. Транзисторы по сигналам процессора, на основании сигналов, получаемых от датчиков Холла или вращающегося трансформатора, в зависимости от частоты вращения и положения вала ротора, переключают обмотки статора, создавая вращающееся магнитное поле, которое взаимодействует с полем магнитов ротора.

Как правило, в конструкции статора бесщеточного электродвигателя используются три пары обмоток, и напряжение на них подается поочередно. При подаче напряжения на первую пару обмоток якорь с постоянными магнитами поворачивается, выравнивая свое положение в соответствии с направлением силовых линий возникшего магнитного поля. В этот момент напряжение с первой пары обмоток снимается и подается на вторую пару. Поскольку якорь электродвигателя обладает определенным моментом инерции, он не останавливается моментально, а продолжает свое вращение, и его магниты начинают взаимодействовать со следующим магнитным полем. Так продолжается до тех пор, пока на обмотки статора поочередно подается напряжение.

*Синхронный электродвигатель* электромобиля – это электрический двигатель, работающий от переменного тока. Главная особенность такого двигателя заключается в том, в его роторе применяется постоянный магнит, или электромагнит (обмотка с подачей питания), который постоянно взаимодействует с вращающимся магнитным полем ротора, которое создает вращение ротора равной частоте вращения магнитного поля.

Синхронные электродвигатели обычно применяют если необходимая мощность должна превышать 100 кВт.

Рассмотрим синхронные электродвигатели легковых автомобилях JAGUAR I-PACE. У электромобиля может быть установлен один или два ходовых электродвигателя. Например, в JAGUAR I-PACE установлено два ходовых электродвигателя установленных на передней и задней оси (рисунок 1). Это позволяет производить разгон до 100 км/ч за 4,5 с, сравнимый со спортивными автомобилями.

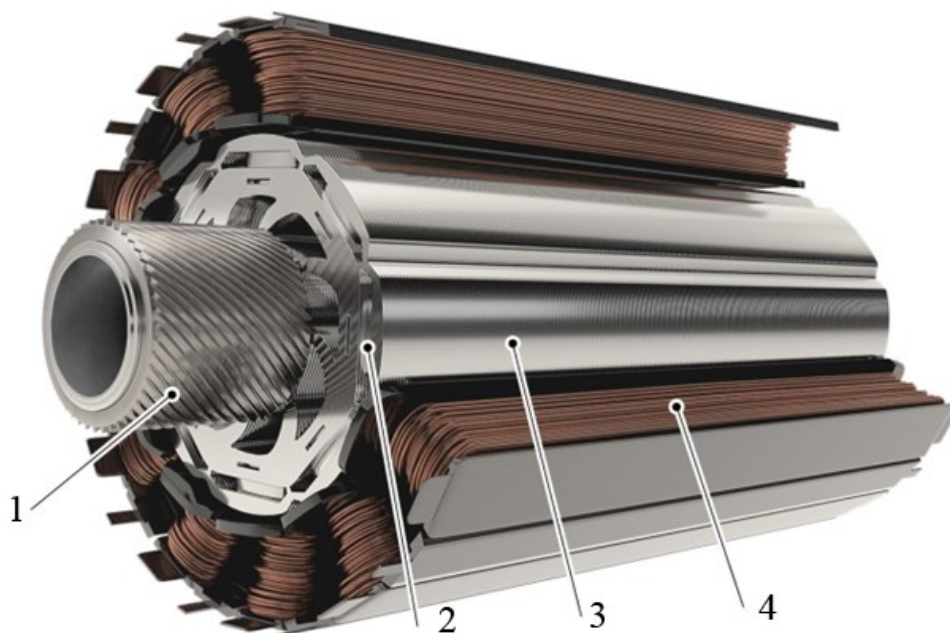


а – передний блок электропривода; в – передний блок электропривода; 1 – разъем жгута проводов привода стояночной; 2 – соединение сапуна блокировки; 3, 4 – соединение охлаждающей жидкости; 5 – разъем трехфазного кабеля к соответствующему инвертору; 6 – разъем жгута проводов 12 В

**Рисунок 1 - Расположение электродвигателей в JAGUAR I-PACE**

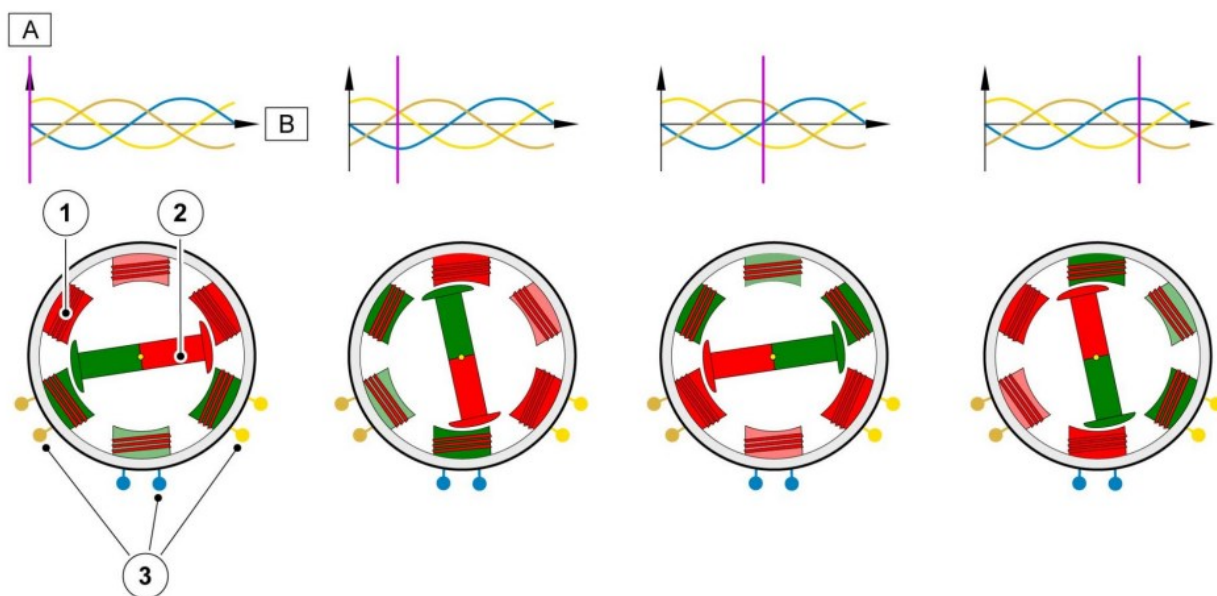
В движение электромобиль приводят два синхронных блока электропривода (EDU) с постоянными магнитами, встроенные в переднюю и заднюю ось. Каждый блок оснащен одноступенчатой коробкой передач с планетарным редуктором и открытым дифференциалом, связанным непосредственно с электродвигателем. Каждое колесо подсоединено к коробке передач с помощью полуоси, обеспечивая возможность полного привода. EDU обеспечивает мощность 147 кВт и крутящий момент 348 Н·м от каждого электродвигателя. Каждый электродвигатель подсоединяется к инвертору. Инвертор управляет работой электродвигателя в ответ на входные сигналы педалей ускорения и тормоза.

Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами (рисунок 2), используют ротор с постоянными магнитами, которые синхронизируются с электромагнитным полем, созданным на обмотках статора. Если прикладывать трехфазный переменный ток к обмоткам статора, в последовательности, которая постепенно изменяет полярность каждой обмотки, то вокруг статора создается вращающееся электромагнитное поле. Положение ротора совпадает с этим вращающимся электромагнитным полем, которое притягивает магнитное поле ротора, заставляя ротор вращаться. Когда ротор и магнитные поля вращающегося статора полностью синхронизированы, скорость вращения ротора прямо пропорциональна приложенной к нему частоте переменного тока. В этом состоянии электродвигатель вырабатывает максимальную мощность.



1 - первичная шестерня коробки; 2 - постоянный магнит передач; 3 – ротор; 4 - обмотки статора  
**Рисунок 2 - Синхронный электродвигатель электромобиля с постоянными магнитами**

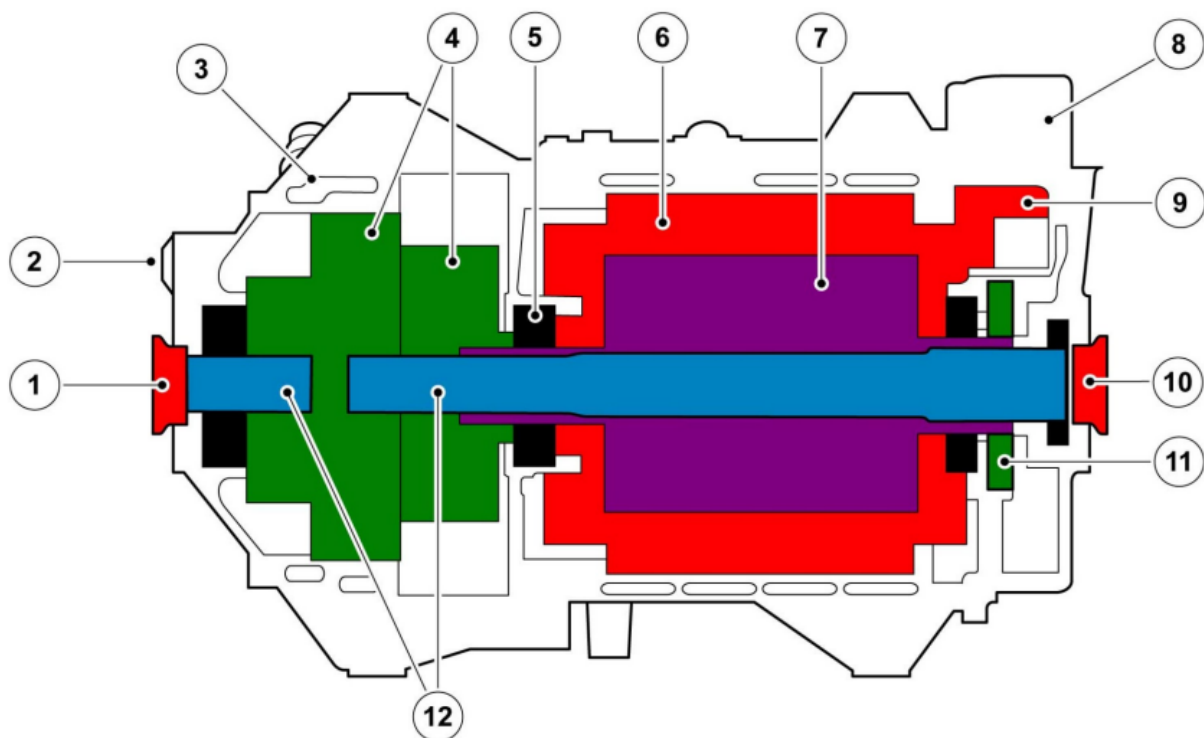
На рисунке 3 показан процесс вращения простого синхронного электродвигателя с постоянным магнитом, который вращается по часовой стрелке.



A – напряжение/амплитуда; B – время; 1 – обмотки статора; 2 – ротор; 3 – трехфазное соединение  
**Рисунок 3 – Принцип работы синхронного электродвигателя**

Трехфазный переменный ток, подаваемый на обмотки статора, регулируется для перехода от одного набора обмоток к следующему, и ротор следует ему с той же скоростью. Величина и фаза тока, подаваемого на обмотки статора, пропорциональны выходной мощности двигателя, поэтому для обеспечения эффективности электродвигателя требуется точное управление.

Датчик положения кольца резольвера 11 (рисунок 4) используется для точного определения скорости и положения ротора относительно вращающегося электромагнитного поля, чтобы обеспечить полное управление выходом электродвигателя.



1 – сальник полуоси; 2 – пробка маслозаливной горловины EDU; 3 – рубашка охлаждающей жидкости; 4 – коробка передач и дифференциал; 5 – подшипник; 6 – статор; 7 – ротор; 8 – корпус; 9 – трехфазное соединение; 10 – сальник полуоси; 11 – датчик положения кольца резольвера; 12 – привод полуоси

**Рисунок 4 – Схема синхронного блока электропривода**

Резольвер – это вращающийся трансформатор, принципом работы является преобразование угла поворота в электрическое напряжение. В качестве измерения применяется амплитуда напряжения, которая пропорциональна углу, или является функцией синус (косинус) угла. С помощью их принципа работы определяется актуальное положение ротора электродвигателя, с помощью этого можно определить например – скорость вращения вала двигателя. Во время работы резольвера между его обмотками наводятся ЭДС, амплитуда и фаза которых, зависит от положения ротора резольвера, на котором расположена одна (или несколько) из обмоток электродвигателя переменного тока. При работе резольвера, в пределах одного, полного оборота ротора, форма амплитуд ЭДС вторичных обмоток резольвера характеризует угол поворота ротора.

Выходной сигнал резольвера подается непосредственно в инвертор. Затем инвертор подает надлежащую частоту и напряжение к катушкам статора. Кроме того, инвертор использует информацию о положении, чтобы гарантировать, что ротор постоянно остается синхронизированным с вращающимся магнитным полем. Крутящий момент создается тогда, когда магнитное поле ротора отстает от вращающегося магнитного поля статора. Поскольку постоянные магниты постоянно пытаются "догнать" вращающееся магнитное поле статора, вращая вал ротора, а значит приводя в движение электромобиль. Синхронизация входного сигнала переменного тока является опережающей относительно положения ротора, чем больше это опережение входного сигнала, тем больше создаваемый крутящий момент. Однако слишком сильное опережение входного сигнала переменного тока приведет к тому, что магнитные поля будут выходить из режима синхронизации, и электродвигатель остановится.

Синхронизация входного сигнала переменного тока также может отставать от положения ротора. Действующее вращающееся магнитное поле пытается вращать ротор в противоположном направлении, создавая регулируемый тормозной момент. Именно в этом состоянии кинетическая энергия торможения преобразуется в электрическую энергию, электродвигатель становится генератором. Когда ротор перемещается вокруг статора, магнитное поле ротора проходит через обмотки статора, индуцируя трехфазный переменный ток. Частота вращения ротора и сила поля обмоток статора пропорциональны мощности генератора.

Работой каждого EDU управляет подключенный инвертор в зависимости от запроса крутящего момента, выдаваемого блоком управления силовым агрегатом. Инвертор переключает EDU между режимами электродвигателя и генератора по необходимости. Когда EDU работает в режиме электродвигателя, инвертор получает постоянный ток от высоковольтной аккумуляторной батареи и преобразует его в 3-фазный переменный ток. Высоковольтный переменный ток подается на трехфазные обмотки статора в электродвигателе. Данные датчика положения резольвера используются для управления фазой трехфазного переменного тока. Инвертор разделяет трехфазный переменный ток высокого напряжения на EDU в зависимости от требований к крутящему моменту. Инвертор и РСМ обмениваются данными через сеть по шине FlexRay.

При работе в режиме рекуперативного торможения EDU генерирует трехфазный переменный ток для инвертора. Инвертор выпрямляет переменный ток в постоянный ток и регулирует напряжение для зарядки высоковольтной аккумуляторной батареи. Инвертор управляет электрической энергией, восстановленной во время рекуперативного торможения, и регулирует эффект торможения на передних и задних колесах. Данные для величины торможения, требуемого от каждого EDU, отправляются в инвертор из РСМ по шине сети FlexRay.

*Синхронные реактивные электродвигатели с внутренним постоянным магнитом (СинРМ).* Для электромобиля наиболее существенное значение имеет его пусковой момент, от которого зависит время трогания электромобиля. В существующих асинхронных электродвигателях, применяемых для электромобилей, пусковой момент не является эффективным. Кроме того, недостатком синхронного электродвигателя является то, что при длительных поездках на высокой скорости теряется 3–4 % мощности на выработку тока в стержнях ротора.

Чтобы устранить эти недостатки, в настоящее время фирма Tesla начала производство для своих автомобилей синхронных электродвигателей, в которых используется не только электромагнитное, но и реактивное воздействие на ротор электродвигателя. Такие двигатели получили название синхронные реактивные двигатели.

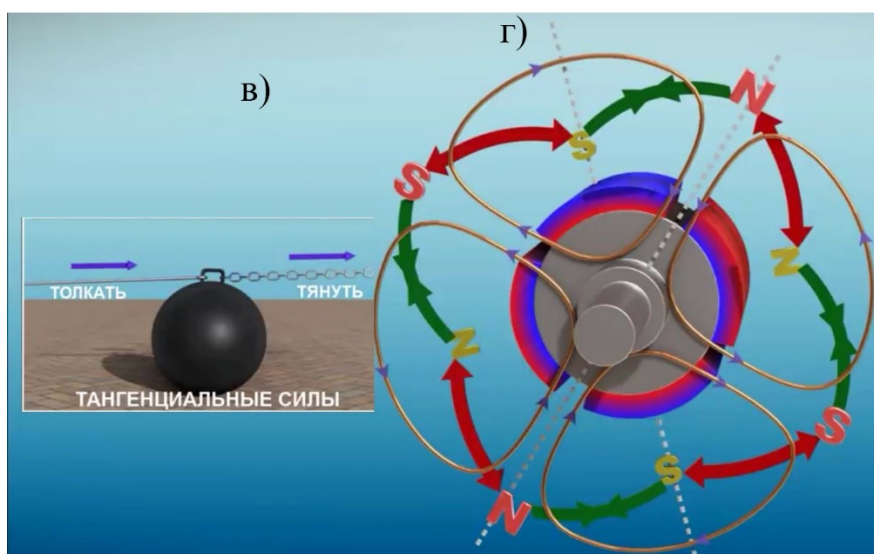
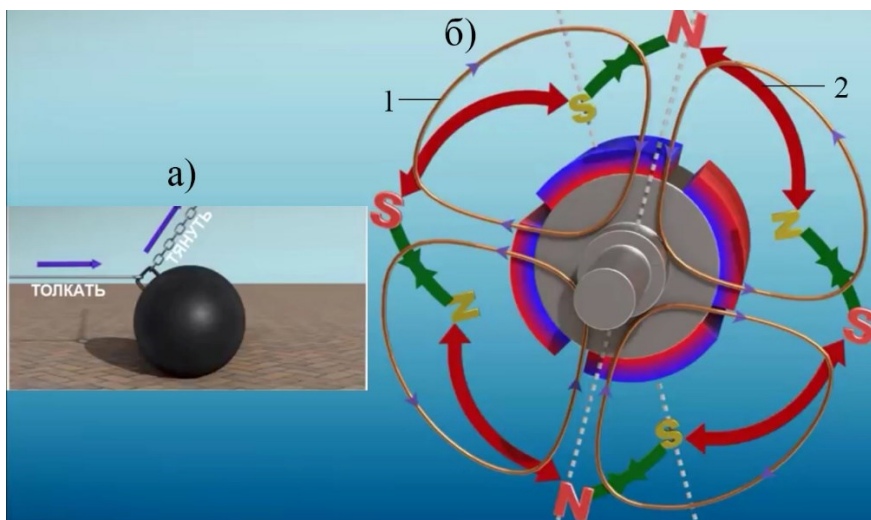
В двигателях этого типа взаимодействие магнитных полей ротора и статора заставляет ротор вращаться. Если повернуть магнитное поле статора на  $45^\circ$  относительно ротора, ротор получает максимальный крутящий момент. Это связано с тем, что силы притяжения и отталкивания (толкающее усилие магнитного поля статора и тянущее усилие магнитного поля ротора) проходят почти по касательной к ротору и создают крутящие моменты практически в одном направлении.

Это видно из примера толкания мяча по горизонтальной плоскости (рисунок 5, а, в). При одинаковом направлении толкающих и тянущих сил, общая сила, передвигающая мяч, будет больше суммарной силы при положении тянущей силы под углом.

Недостатком электродвигателя с постоянными магнитами является также то, что при движении электромобиля по ровной поверхности постоянной высокой скоростью, силовые линии, создаваемые постоянными магнитами, пересекают витки обмотки статора, создавая там обратную электромагнитную силу. Чем выше частота вращения ротора, тем сильнее становится обратная электромагнитная сила, что снижает эффективность работы электродвигателя и увеличивает его нагрев. Этих недостатков лишены синхронные электрические реактивные двигатели.

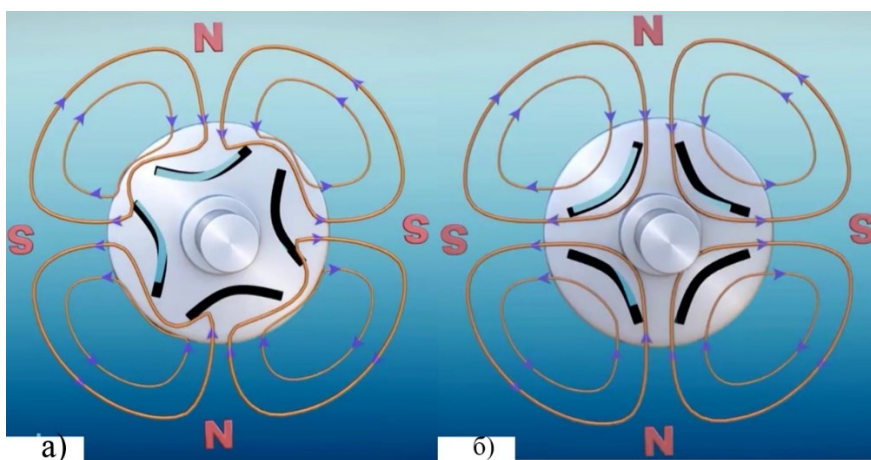
Принцип работы реактивного синхронного двигателя заключается в следующем. Известно, что железо по сравнению с воздухом, хорошо удерживает магнитные силовые линии магнитного поля. В связи с этим, если в железном роторе сделать прорезы, то от положения ротора сопротивление магнитным силовым линиям будет меняться, увеличиваясь или уменьшаясь, в зависимости от того, в чем они будут проходить – в железе или в воздухе (рисунок 6).

В положении ротора (рисунок 6, а) сопротивление магнитным силовым линиям будет высокое, потому что они проходят через железо, а в положении (рисунок 6, б), при котором ротор повернут на  $45^\circ$  – низким. Ротор всегда имеет тенденцию переходить в положение, когда сопротивление магнитного поля будет низким вращаясь вместе с ним. Таким образом ротор может всегда находиться в положении, когда магнитное поле имеет низкое сопротивление, при этом скорость вращения ротора будет совпадать со скоростью вращения магнитного поля статора. Крутящий момент при этом режиме работы электродвигателя называют реактивным моментом, а электродвигатели, в которых используется данный принцип работы называют синхронными реактивными электродвигателями, приспособленными для высоких скоростей движения электромобиля.



а – тянущая и толкающая силы под разными углами; б – магнитное поле статора совпадает с магнитным полем ротора; в – тянущая и толкающая силы под одним углом; г – магнитное поле статора расположено под углом  $45^\circ$  относительно магнитного поля ротора; 1 – магнитное поле статора; 2 – магнитное поле ротора

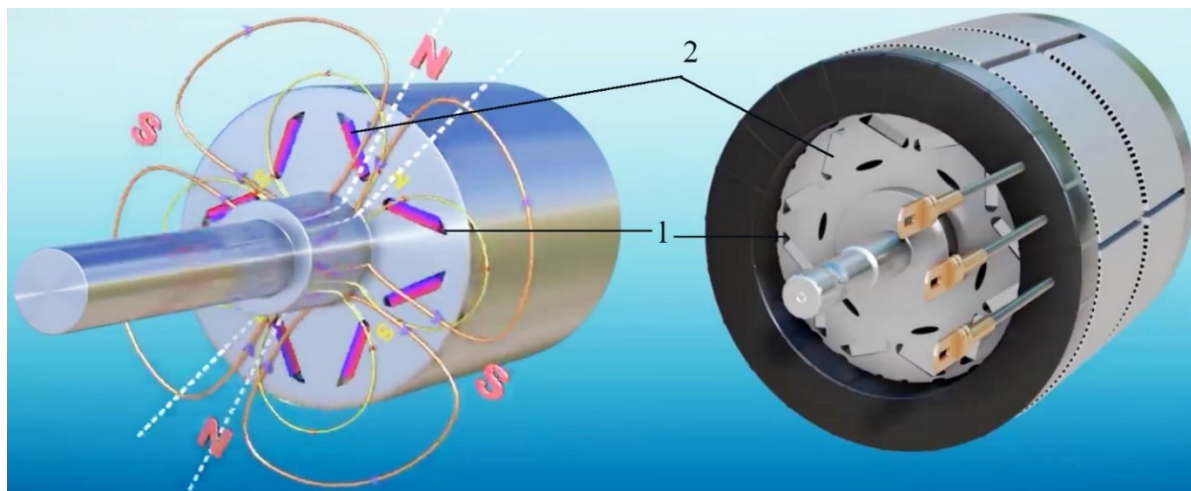
**Рисунок 5 – Схема действия магнитных сил**



а – высокое сопротивление магнитным силовым линиям; б – низкое сопротивление магнитным силовым линиям

**Рисунок 6 – Состояние магнитных силовых линий в зависимости от положения ротора**

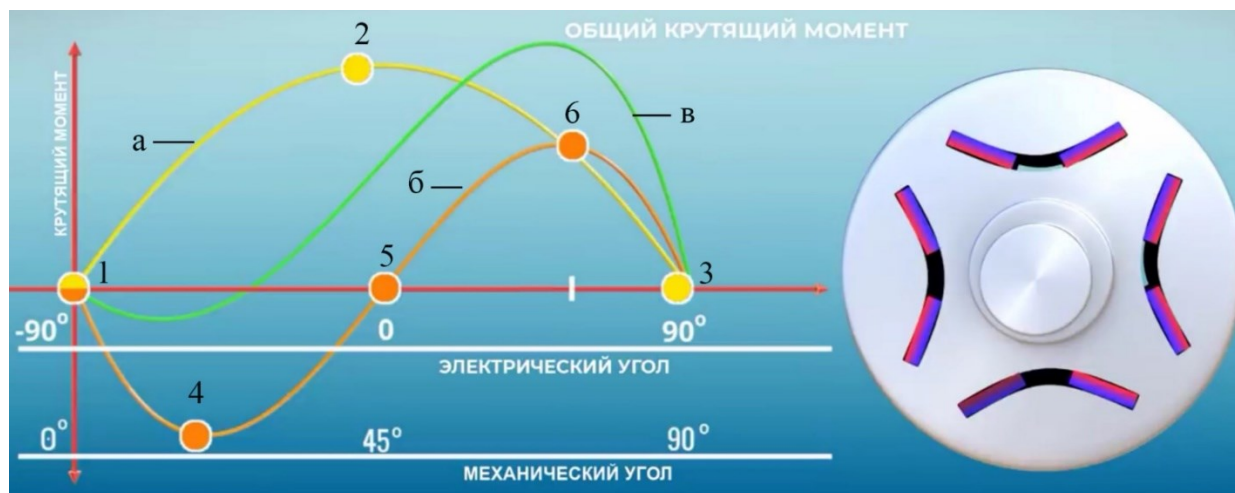
Для того чтобы объединить положительные особенности работы синхронных электродвигателей, использующих возможность получения максимального крутящего момента, так и синхронных реактивных электродвигателей, использующих возможность получения низкого сопротивления магнитного поля и в связи с этим уменьшения обратной электромагнитной силы при движении электромобиля с высокими скоростями движения, конструкторы Tesla создали новый электродвигатель. Такой электродвигатель устанавливается на модели электромобилей Tesla M3 (рисунок 7).



1 – прорези; 2 – постоянные магниты  
**Рисунок 7 – Электродвигатель Tesla M3**

В таком электродвигателе постоянные магниты 2 помещаются в прорези 1 ротора. Такое размещение дополнительно снижает влияние магнитов на обмотку статора и таким образом снижает обратное электромагнитное поле. Относительная проницаемость магнитов почти такая же, как и у воздуха, поэтому они будут препятствовать прохождению электромагнитного поля через него, так же как препятствует воздух, тем самым создавая реактивный момент.

Изменение крутящего момента в комбинированном электродвигателе можно рассмотреть по графику, представленному на рисунке 8.



а – влияние магнитного поля статора на изменение крутящего момента; б – влияние магнитного поля ротора на изменение крутящего момента; в – суммарный крутящий момент

**Рисунок 8 – График изменения крутящего момента**

В первоначальный момент, (точка 1, кривая, а), ротор не вращается и крутящий момент равен нулю. Если магнитное поле статора поворачивается на угол  $45^\circ$  (точка 2, кривая, а) крутящий момент действует на постоянные магниты по часовой стрелке, благодаря влиянию магнитного поля статора. Под этим углом достигается максимальный крутящий момент от постоянных магнитов. Поворот магнитного поля еще на  $45^\circ$  (точка 3, кривая, а), приводит к тому, что крутящий момент, который производит ротор стремится к нулю.

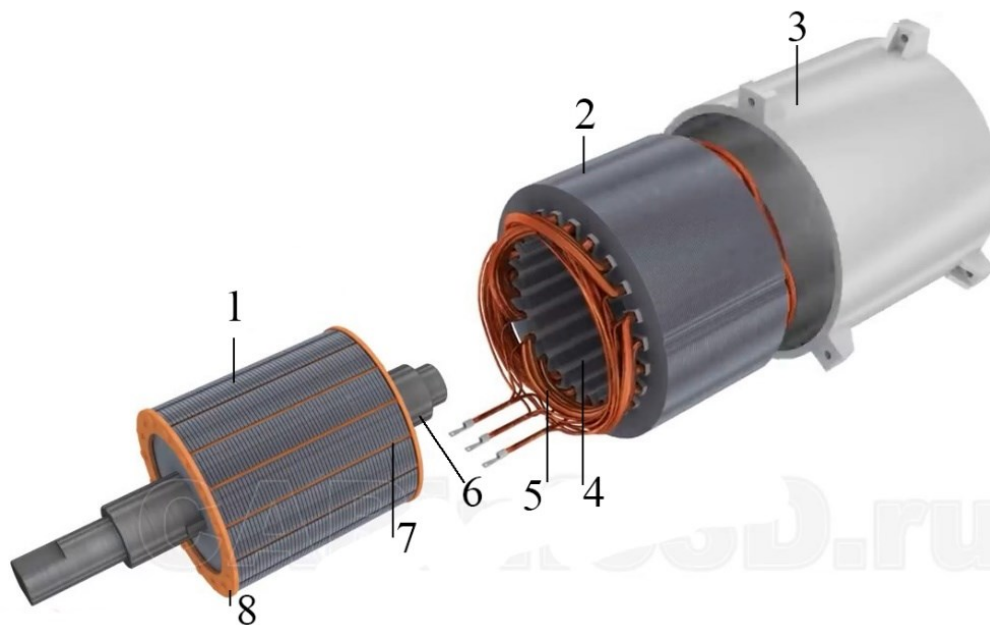
Железная часть ротора оказывает противоположное влияние на изменение крутящего момента (кривая б). При начальном угле крутящий момент равен нулю, потому что это неуровненное и симметричное поведение магнитного поля статора. Смещая магнитное поле статора по часовой стрелке, ротор будет испытывать максимальный и отрицательный крутящий момент (точка 4, кривая б). При повороте магнитного поля статора на угол  $45^\circ$  крутящий момент снова становится нулевым (точка 5, кривая б), поскольку это снова симметричный случай. При дальнейшем вращении магнитного поля статора, создаваемый реактивный крутящий момент ротора становится положительным (точка 6, кривая б).

Из кривой в графика суммарного крутящего момента видно, что при угле магнитного поля статора около  $50^\circ$  получается максимальный крутящий момент электродвигателя, поэтому при трогании электромобиля с места угол магнитного поля статора относительно магнитного поля ротора составляет около  $45 \dots 50^\circ$ . По мере увеличения скорости движения электромобиля индуцируется обратное магнитное поле катушек статора. Чтобы устранить эту проблему в электродвигателе Tesla М3 при высоких скоростях движения электромобиля магнитное поле статора уравнивается. При этом магнитное поле постоянного магнита (статора) ослабевает до минимума, практически не создавая реактивного момента и возникновение крутящего момента будет происходить за счет эффекта сопротивления.

Рассмотренные выше синхронные электродвигатели с внутренним постоянным магнитом (СинРМ) имеют эффективность до 96%, в то же время как асинхронные двигатели – до 94%. В асинхронных двигателях необходима система охлаждения ротора, электродвигателях СинРМ ротор не греется и необходимости в системе охлаждения нет.

Аналогичные виды электродвигателей применяются на гибридном автомобиле Toyota Prius. Разница заключается в магнитах. В Toyota Prius используются цельные магниты, в Tesla М3 составные. Состоящие из четырех частей, что позволяет снизить вихревые токи, а значит и их нагревание, что предохраняет также такие магниты от размагничивания.

*Асинхронные двигатели* — электрический двигатель переменного тока, частота вращения ротора которого не равна (в двигательном режиме меньше) частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора. Иногда асинхронные моторы называют индукционными, так как в роторе в соответствии с законом Ленца у них индуцируется электромагнитная сила. Ротор вращается не синхронно с вращающимся полем статора. Общее устройство асинхронного двигателя показано на рисунке 9.



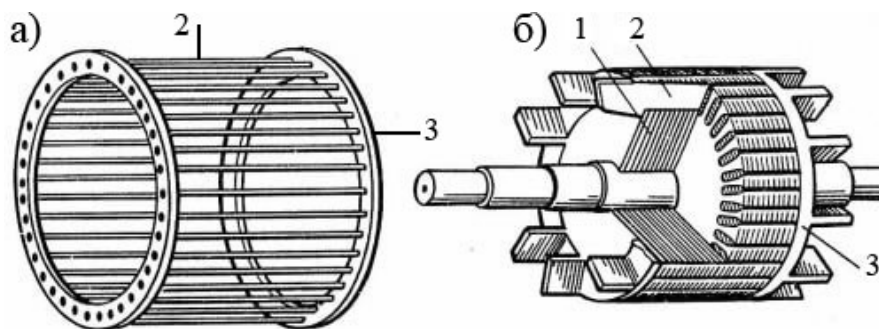
1 – ротор; 2 – статор; 3 – корпус; 4 – паз; 5 – обмотка; 6 – вал; 7 – стержень; 8 – кольцо

**Рисунок 9 – Общее устройство асинхронного электродвигателя**

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: короткозамкнутого ротора 1 и статора 2, которые установлены в корпусе 3. Основой статора является сердечник, который набирается из листов специальной электрической стали. Листы изолированы между собой и имеют пазы 4 с внутренней стороны. В пазы сердечника устанавливается изоляция и укладывается обмотка 5 из медного изолированного специальным лаком провода.



Аналогично устроен и ротор, сердечник которого представляет собой «беличье колесо» (рисунок 10), закрепленное на валу и состоящее из набора металлических медных стержней 2, впаянных или залитых в сердечник 1 замкнутых между собой кольцами 3. Для уменьшения высших гармоник ЭДС и пульсации магнитного поля, стержни укладывают не вдоль вала, а под определенным углом относительно оси вращения.



1 – сердечник; 2 – набор металлических стержней; 3 – кольцо  
**Рисунок 10 – «Беличье колесо» (а) и короткозамкнутый ротор (б)**

В роторе асинхронного двигателя при запуске отсутствует электрический ток. Однако после начала вращения магнитного силового поля статора оно воздействует на металлические стержни (обмотки) «беличьего колеса», возбуждая в нем ЭДС. После этого уже в самом роторе появляется магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем статора и электродвигатель начинает работать в штатном режиме. Вследствие потерь времени на возникновение рабочего магнитного поля статора, его магнитное поле отстает от магнитного поля статора, поэтому такой двигатель и называют асинхронным.

Принцип действия асинхронного двигателя основан на силовом действии магнитного поля. Вращающееся магнитное поле, создаваемое токами обмотки статора, индуцирует в обмотке ротора ЭДС. Так как обмотка ротора всегда замкнута, то по ней под действием этой ЭДС будут протекать токи. Магнитное поле, взаимодействующее с этими токами ротора, создает на его валу вращающий электромагнитный момент, который всегда направлен в сторону вращения магнитного поля. Под действием этого момента ротор начинает вращаться со скоростью  $n_2$ .

Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС в обмотке ротора будет индуцироваться только в том случае, если плоскость витков обмотки не совпадает с направлением магнитного поля, то есть ротор вращается либо медленнее, либо быстрее поля. Согласно принципу действия асинхронной машины скорость вращения магнитного поля и скорость вращения ротора всегда должны быть разными:  $n_2 \neq n_1$ . Если бы частота вращения ротора совпадала с частотой вращения магнитного поля статора, то в стержнях ротора не создавалась бы электродвижущая сила, а следовательно, и ток. Из принципа действия следует, что у асинхронного двигателя  $n_2 < n_1$  (ротор отстает от магнитного поля), а у асинхронного генератора –  $n_2 > n_1$  (ротор опережает магнитное поле).

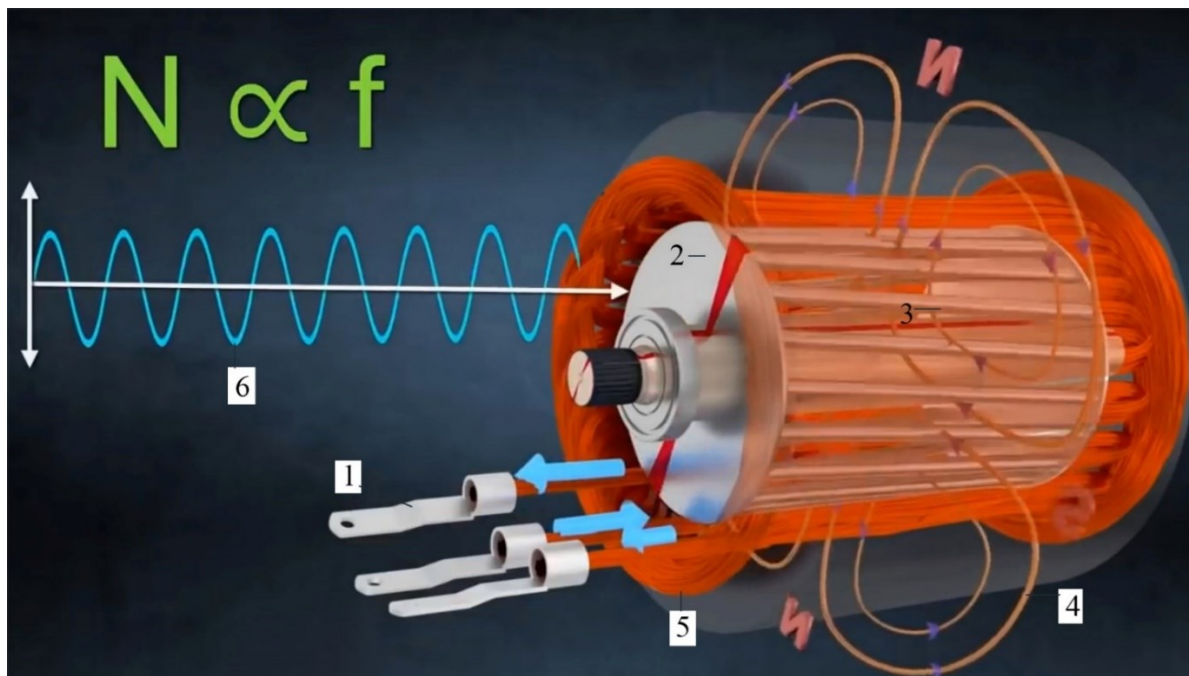
Величина индуцированной ЭДС зависит от частоты пересечения проводников вращающимся магнитным полем. То есть, чем выше разница между  $n_1$  и  $n_2$ , тем больше будет величина ЭДС. Ротор будет вращаться с частотой  $n_2$ , которая всегда будет отставать от синхронной частоты поля статора  $n_1$ . Эта разница между обеими частотами и будет частотой скольжения  $\Delta n = n_1 - n_2$ . Данное неравенство является необходимым условием появления электромагнитного вращающегося момента в асинхронном двигателе. Поэтому электродвигатель так и называется, поскольку вращение ротора происходит несинхронно с полем статора. Понятие скольжения представляет собой отношение частоты вращения к частоте поля. Данная величина  $S$  берется в процентном отношении от частоты вращения магнитного поля. В соответствии с этим, частота вращения ротора, определяемая с помощью скольжения составит:

$$n_2 = n_1 (1 - S).$$

Ротор асинхронного двигателя вращается в том же направлении, что и его магнитное поле. В свою очередь, направление вращения поля зависит от последовательности фаз трехфазной сети. Изменить направление вращения ротора возможно за счет изменения направления течения тока. Так как ток переменный, чтобы снизить потери из-за блуждающих токов сердечник статора набирают

из тонких стальных пластин, изолированных друг от друга окалиной и скрепленных лаком. На обмотки статора подают питающее напряжение, ток, протекающий в них, называют током статора.

Типичным трехфазным асинхронным двигателем оснащены, например, известные автомобили Tesla S и Tesla X, который состоит из статора и ротора (рисунок 11). Ротор представляет собой набор электропроводящих стержней 3 накоротко замкнутых с торцов дисками 2. Трехфазный переменный ток подается на статор. Проходя по обмоткам ток создает вращающееся четырехполюсное магнитное поле 4, которое индуцирует ток в стержнях ротора.



1 – контактные клеммы; 2 – диск; 3 – стержень; 4 – полюсное магнитное поле; 5 – обмотка статора; 6 – импульсы тока;  $N$  – частота вращения вала ротора;  $f$  – частота переменного тока

**Рисунок 11 – Схема индукционного асинхронного электродвигателя**

В асинхронном электродвигателе Tesla скорость вращения ротора зависит от частоты вращения переменного тока. Изменяя частоту переменного тока в (источнике питания) инверторе, можно изменить скорость вращения ротора, а значит и ведущих колес автомобиля. Питание электродвигателя осуществляется от частотно–регулируемого привода, который контролирует частоту вращения (якоря) ротора от 0 до 18000 мин<sup>-1</sup>.

Питание электродвигателя осуществляется от АКБ выдающей напряжение порядка 288 – 440 В, ток от которой передается в инвертор 3 (рисунок 12). Для работы управления электродвигателем применяется инвертер, который преобразует постоянный ток батареи в трехфазный переменный ток, а также увеличивает и уменьшает силу и частоту переменного тока, что позволяет управлять скоростью вращения магнитного поля статора, а значит и скоростью вращения ротора и пропорционально скоростью вращения колес электромобиля.

Изменяя частоту тока, изменяют частоту вращения вала ротора, а значит и скорость движения электромобиля, изменяя амплитуду изменяют крутящий момент. Для того чтобы изменить направление вращения ротора, например, для получения заднего хода, меняют фазы.

Инвертер также меняет фазы для изменения напряжения вращения ротора при необходимости движения задним ходом.

Электромобиль имеет систему рекуперации энергии. Во время торможения ротор вращается быстрее магнитного поля и электродвигатель начинает работать в режиме генератора (рисунок 13). При этом магнитное поле системы рекуперации начинает противодействовать вращению вала электродвигателя автомобиля, а рекуперированная энергия заряжает аккумуляторную батарею. Инвертер генерирует электроэнергию в катушки статора, образуя больше энергии, чем требуется для работы электромобиля. Сгенерированный переизбыток электричества после его преобразования в постоянный ток идет на зарядку АКБ. Во время зарядки на ротор действует противоэлектродвижущая сила, поэтому ведущие колеса автомобиля замедляются.

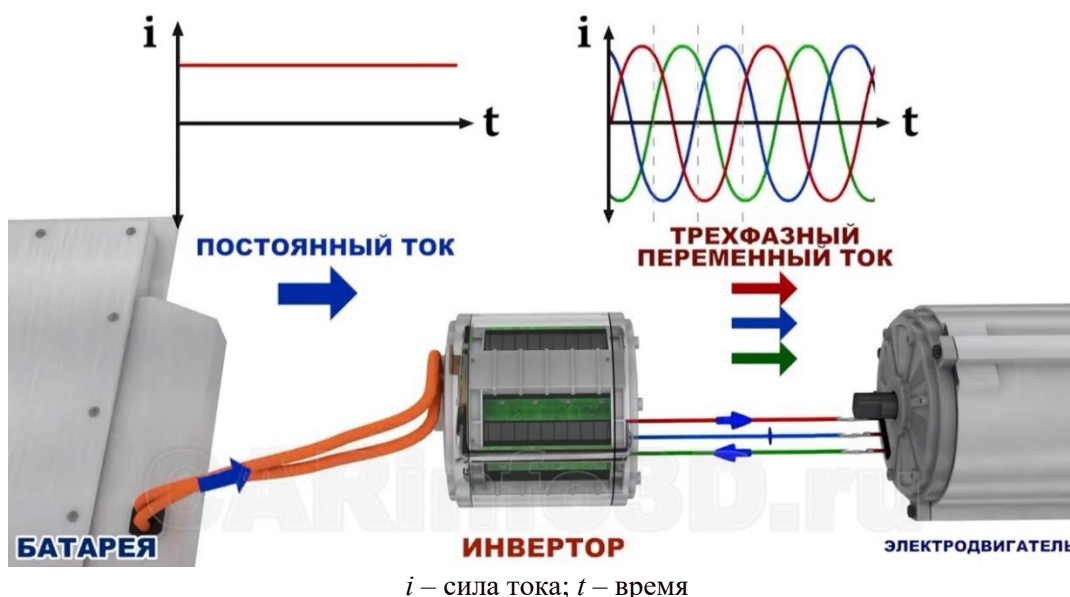


Рисунок 12 – Схема подключения инвертора в систему управления электродвигателем

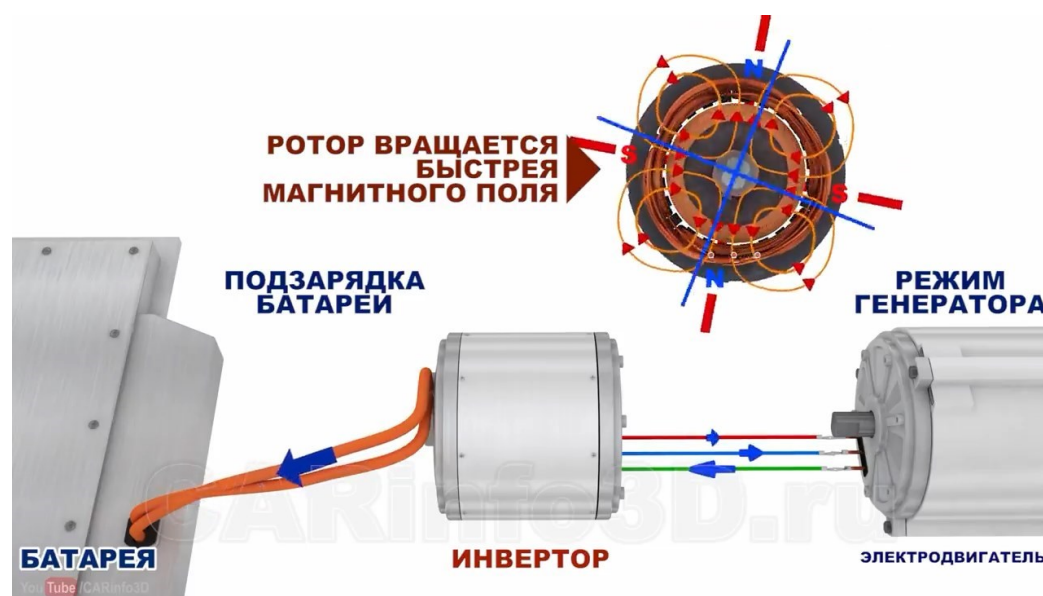


Рисунок 13. Схема работы электродвигателя в режиме генератора

#### Список использованных источников

1. Варзаносов, П. В. Выбор системы управления двигателем электромобиля. Технические науки в России и за рубежом : материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2016 г.). — М. : Издательский дом «Буки–Веди», 2016. – 88 с.
2. Oleg Nikolaevich Ivanov, Nikita Olegovich Listov, Andrey Vladimirovich Ostroukh Research Technical Specifications of Electric Bus as the Advanced Urban Passenger Vehicle. Материалы XIV международной научно–практической конференции молодых ученых «теория и практика применения информационных технологий в промышленности, строительстве и на транспорте», Россия, г. Москва, 10 декабря 2015 г.
3. Савич, Е. Л. Устройство автомобилей. Двигатели / Е. Л. Савич. – Минск : Вышэйшая школа, 2019. – 334 с.
4. Achim Kampker. Prof. Dr.–Ing. Elektromobilproduktion. Springer–Verlag Berlin Heidelberg 2014 – 289 s.