

ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ИХ РАСЧЕТ

*канд. техн. наук, доц. А.С. ГУРСКИЙ, канд. техн. наук, проф. Е.Л. САВИЧ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Рассмотрены компоненты высоковольтных сетей электромобилей и их взаимосвязь с компонентами низковольтных сетей, а также способы их преобразования. Показана зависимость массогабаритных параметров от напряжения передаваемого тока высоковольтной сети электромобиля. Расчеты подтвердили возможность использования параметра «падение напряжения» в проводах для контроля силы тока без использования дополнительных шунтов. Описаны отличительные особенности выходных силовых ключей и схема драйвера инвертора. Проанализирована работа однофазной мостовой схемы с четырьмя различными состояниями включения. Представлен принцип организации синусоидальной формы с использованием широтно-импульсной модуляции, с приведенной осциллограммой формируемого сигнала. Показан синтез системы трехфазного переменного тока. Определены параметры абсолютного и относительного скольжения ротора электродвигателя путем считывания, частоты вращения и положения ротора электродвигателя и вращающегося магнитного поля статора при считывании с выходных каскадов инвертора.

Ключевые слова: *электромобиль, высоковольтная сеть, параметры, напряжение, сопротивление, электродвигатель, инвертор, высоковольтная аккумуляторная батарея, фаза.*

Введение. Популярность электрических и гибридных автомобилей растет с каждым годом. Как общественный транспорт все чаще используются электробус и троллейбус с повышенным запасом хода. Предприятия по обслуживанию автомобилей приобретают электрическую окраску. Одновременно со всеми достоинствами электрический транспорт привносит ряд трудностей, с которыми сталкиваются обслуживающие предприятия. Помимо опасности при выполнении работ, в первую очередь возникают трудности с диагностированием электромобилей и гибридных автомобилей. Основой качественной диагностики является знание конструкции отдельных компонентов и электромобиля в целом¹.

В любой современной системе можно выделить три основных компонента:

- электронный блок управления системы;
- исполнительные устройства;
- датчики и шины данных.

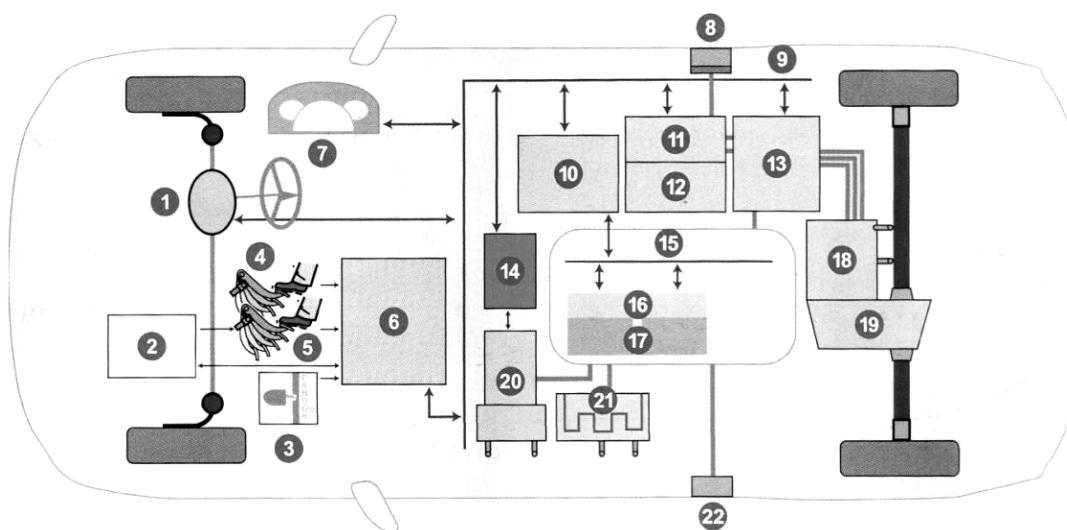
Однако в системе существует и не основной, но очень важный компонент – коммутационная аппаратура. По статистике вероятность возникновения неисправностей, связанных с коммутационной аппаратурой, достигает 30%.

Представляя электромобиль в виде системы, можно детально рассмотреть все составляющие компоненты и подсистемы. Каждая подсистема может быть представлена как отдельная система, выполняющая специфические функции. В данной работе будет уделено внимание системе передачи и преобразования высоковольтной энергии, которой являются инвертор и коммутационная аппаратура. В электромобилях и гибридных автомобилях используется высоковольтная сеть и низковольтная бортовая сеть. Бортовая низковольтная сеть 12 В питает все системы электромобиля как и в традиционных автомобилях, такие как система освещения, сигнализации, безопасности и др. Высоковольтная сеть используется для снабжения электропривода большой электрической мощностью [1]. Напряжение высоковольтной сети обычно составляет от 400 до 800 вольт, иногда выше. Электроснабжение низковольтной сети осуществляется от кислотной свинцовой аккумуляторной батареи и инвертора постоянного тока, а на гибридных автомобилях иногда используется и классический низковольтный генератор.

Основная часть. Электронный блок управления (ЭБУ) (англ. Electronic Control Unit (ECU)) 6 электромобиля или гибридного автомобиля питается от низковольтной бортовой сети и активируется электрическим выключателем (замком) зажигания (рисунок 1). Являясь координатором высоковольтной системы, ЭБУ объединен в сеть с традиционными системами автомобиля: тормозной системой 5, рулевым управлением 1 и наиболее важными высоковольтными компонентами: высоковольтной батареей 15 и инвертором 13. Основной обмен данными с датчиками и исполнительными механизмами происходит по шине CAN 9 [2; 3]. ЭБУ управляет инвертором по сети CAN или FlexRay с использованием импульсно-кодовой модуляции в двоичной системе

¹ Савич Е.Л., Гурский А.С. Анализ конструкций, методов и средств диагностирования гибридных автомобилей и электромобилей // Автомобиле- и тракторостроение: материалы Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. – Минск: БНТУ, 2019. – Т. 2. – С. 69–73.

исчисления. Используя полученные сигналы, ЭБУ реализует все заложенные функции работы электромобиля. В зависимости от характера движения электромобиля реализуется режим электродвигателя или генератора посредством переключения инвертора.



1 – электродвигатель рулевого управления; 2 – электровакуумный насос; 3 – щиток приборов; 4 – педаль акселератора; 5 – педаль тормоза; 6 – ЭБУ электромобиля; 7 – рычаг выбора режимов движения; 8 – зарядная розетка; 9 – шина CAN; 10 – ЭБУ высоковольтной батареи; 11 – бортовой зарядный блок; 12 – DC/DC преобразователь; 13 – инвертор; 14 – ЭБУ кондиционера; 15 – высоковольтная батарея; 16 – датчик батареи; 17 – аккумуляторная батарея; 18 – электродвигатель; 19 – трансмиссия; 20 – компрессор кондиционера; 21 – отопитель; 22 – разъем быстрой зарядки

Рисунок 1. – Общая схема электромобиля и сопутствующих компонентов

Для реализации требуемой частоты вращения ротора и крутящего момента, создаваемого электродвигателем, ЭБУ определяет необходимое потребление электроэнергии от высоковольтной аккумуляторной батареи (ВАКБ) на основании сигналов различных датчиков [3]:

- положения педали акселератора (хода) 4 (сигнал нагрузки);
- положения педали тормоза 5;
- скорости автомобиля (сигнала скорости);
- положения селектора режима движения 7;
- состояния заряда тяговой батареи и ее температуры 16;
- передаваемого крутящего момента.

Из шин передачи данных в ЭБУ поступают сигналы от блока контроля состояния батареи и инвертора от датчиков температуры электродвигателя, инвертора, высоковольтной аккумуляторной батареи, датчика скорости движения.

В высоковольтной сети основным потребителем является высоковольтный трехфазный инвертор, который в свою очередь снабжает силовой электропривод.

Кроме этого, в высоковольтную сеть подключаются и другие потребители, такие как электрические обогреватели салона и ВАКБ, установленные в некоторых электромобилях, и инвертор преобразования постоянного тока высокого напряжения в постоянный ток низкого напряжения для обеспечения питанием всех потребителей низковольтной сети, в т.ч. для зарядки 12-вольтовой свинцово-кислотной батареи. Дополнительной функцией высоковольтной системы является снабжение электрического компрессора системы кондиционирования воздуха, для двигателя привода которого также используется трехфазный инвертор.

Для того чтобы высоковольтная система была активированной и работоспособной, должны выполняться все следующие условия:

- 12-вольтовая батарея подключена к бортовой низковольтной системе;
- зажигание включено;
- сервисный выключатель или главный выключатель высоковольтной системы включен;
- изоляция высоковольтных компонентов и высоковольтных проводов соответствует необходимым значениям;
- все штекерные соединения исправны;
- датчик удара не активирован.

Коммутационная аппаратура в зависимости от реализации может содержать различные компоненты, однако наиболее часто используемыми являются кабели, соединители, контакторы, аварийные и сервисные выключатели. Кабели могут быть как одножильными, так и двухжильными. Отличительной особенностью высоковольтных кабелей является оранжевый цвет.

При фиксированном уровне мощности более высокие напряжения позволяют уменьшать силу тока, что дает возможность передавать электроэнергию с относительно небольшим сечением электропроводки. Влияние величины напряжения на массогабаритные размеры определяется следующим образом. Весь энергетический расчет следует начинать с классической формулы электрической мощности, передаваемой от системы накопления энергии к электроприводу [4]:

$$P = U \cdot I, \text{ Вт.} \quad (1)$$

В соответствии с приведенной формулой при низком напряжении для передачи нескольких десятков киловатт электроэнергии, необходимых для движения транспортного средства, должен протекать ток с силой, измеряемой тысячами ампер.

В электроприводе принято, что потери напряжения по длине проводника должны быть не более 5%. В таком случае падение напряжения ΔU на участке цепи – не более

$$\Delta U = 0,05U, \text{ В.} \quad (2)$$

При этом сопротивление проводника R принимается

$$R = \frac{\Delta U}{I}, \text{ Ом.} \quad (3)$$

Определяется сечение проводника как

$$S = \frac{\rho \cdot L}{R}, \text{ мм}^2. \quad (4)$$

Далее, используя формулу площади поперечного сечения, вычислим диаметр D проводника:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}, \text{ мм.} \quad (5)$$

$$m = \rho_m \cdot L \cdot S, \text{ кг.} \quad (6)$$

Поскольку удельное сопротивление ρ проводника из меди составляет 0,0175 Ом, длина подключения от высоковольтной АКБ к инвертору равна 2 м, количество проводников – 2, плотность меди $\rho_m = 8900 \text{ кг/м}^3$, то все значения массогабаритных параметров для различных уровней напряжения при передаче электроэнергии при тех же мощностных параметрах рассчитываются по приведенным формулам и сведены в таблицу.

Таблица. – Зависимость диаметра проводников, массы и падения напряжения от передаваемого напряжения

U	m	D	ΔU
12	20,76667	27,25295	0,6
24	5,191667	13,62647	1,2
36	2,307407	9,084315	1,8
48	1,297917	6,813237	2,4
60	0,830667	5,450589	3
72	0,576852	4,542158	3,6
84	0,42381	3,893278	4,2
96	0,324479	3,406618	4,8
108	0,256379	3,028105	5,4
200	0,07476	1,635177	10
300	0,033227	1,090118	15
400	0,01869	0,817588	20
500	0,011962	0,654071	25
600	0,008307	0,545059	30
700	0,006103	0,467193	35
800	0,004673	0,408794	40

Сравнивая габаритные размеры проводников при напряжении 12 В и 800 В, получаем: диаметр провода в $27,3/0,4 = 67,5$ раз в первом случае больше, чем во втором, а масса будет больше в $20,77/0,0047 = 4500$ раз. Результаты расчета подтверждают, что увеличение силы тока требует увеличения сечения кабеля S , что на практике ограничивается стоимостью, весом и местом в автомобиле.

При проведении расчетов в таблицу сведены значения падения напряжения на высоковольтных проводах. При постоянной потребляемой мощности величина падения напряжения прямо пропорциональна передаваемому напряжению. После преобразования формулы (3) получим формулу падения напряжения на участке цепи в соответствии с законом Ома:

$$\Delta U = R \cdot I, \text{ В.} \quad (7)$$

При постоянстве сопротивления провода R величина падения напряжения прямо пропорциональна силе тока в проводе. Параметры «падение напряжения» и «напряжение» могут быть считаны непосредственно с высоковольтных проводов. Высоковольтные провода определенного сечения и определенной длины могут быть использованы в качестве шунтов для определения падения напряжения и соответственно силы тока в цепи. Данный способ с учетом погрешности температуры может быть применен для контроля с высокой точностью силы тока в проводах.

$$I = f(\Delta U), \text{ А.} \quad (8)$$

Мощность в пиковых режимах для электромобиля при напряжении 800 В может достигать 200 А, что соответствует мощности 160 кВт. Расчет сечения провода необходимо проводить исходя из этой мощности, однако следует иметь в виду, что длина проводов в электромобиле (электробусе) может быть значительно больше, чем указанные 4 м, а это требует увеличения сечения провода.

Для обеспечения работы привода в режиме электродвигателя инвертор получает питание постоянного тока от высоковольтной аккумуляторной батареи и преобразует его в 3-фазный переменный ток. Эта функция является главной в назначении инвертора. Инвертор выполняет сложное преобразование постоянного тока в переменный с изменяющейся частотой, силой тока в обмотках и амплитудой выходного сигнала, что позволяет четко управлять частотой вращения вала и крутящим моментом электродвигателя. Таким образом, происходит векторное управление электрической мощностью с высоким коэффициентом полезного действия. Регулирование крутящего момента и мощности дает возможность поддерживать заданную скорость электромобиля и его ускорение. Ускорение электродвигатель должен обеспечить, начиная с низкой скорости, а затем поддерживать по мере ее увеличения. От скорости увеличения частоты вала электродвигателя зависит приемистость электромобиля. В генераторном режиме инвертор выполняет обратное преобразование в виде выпрямления и сглаживания напряжения.

В основе инвертора используется трехфазная полумостовая схема с биполярными транзисторами с изолированным затвором (БТИЗ) (от англ. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)) или транзисторами метал-оксид-полупроводник (МОП) управляемыми электрическим полем (от англ. Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistors (MOSFET)). У транзисторов MOSFET в качестве достоинств следует отметить простоту, дешевизну и высокую скорость срабатывания. Но основной недостаток данного типа транзисторов заключается в квадратичном увеличении силы тока потерь за счет увеличения внутреннего сопротивления канала. Этот недостаток указывает на предпочтительное применение транзисторов с комбинированной схемой включения БТИЗ. Сопротивление канала элементов растет пропорционально изменению силы тока² [5]. Упрощенная эквивалентная схема БТИЗ представлена на рисунке 2.

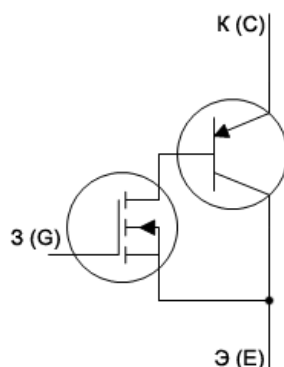


Рисунок 2. – Обозначение упрощенной эквивалентной схемы БТИЗ

² URL: <https://go-radio.ru/igbt-transistor.html>

Подобные комбинированные схемы применялись и ранее, например, схема Дарлингтона, однако комбинации полевых и биполярных позволили получить наилучшие параметры линейности изменения сопротивления. Первый транзистор, как правило, выполняет функцию усиления сигнала по напряжению, второй – по силе тока. Затвор полевого транзистора является общим входом для комбинированной схемы и обозначается как затвор (англ. Gate). Эмиттер биполярного транзистора структуры *P-N-P* является в комбинированной схеме коллектором (англ. Collector), а соединенные параллельно коллектор биполярного транзистора и исток полевого образуют эмиттер (англ. Emitter) комбинированного транзистора. Сток полевого транзистора подключен к базе биполярного транзистора.

Для каждого выходного транзистора используются специальные интегральные схемы – драйверы. Суть работы драйвера заключается в ускорении открывания и закрывания транзисторов, т.к. во время увеличенного переходного процесса открывания и закрывания выделяется огромная тепловая энергия в канале полевого транзистора, способная привести к тепловому пробую последнего. Схема простейшего драйвера затвора транзистора приведена на рисунке 3.

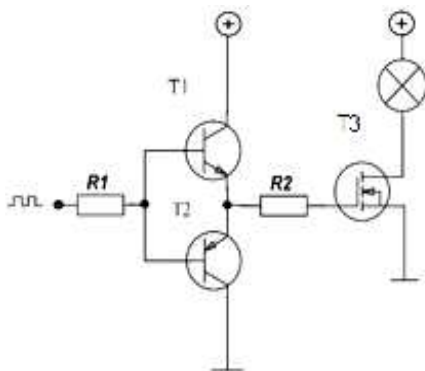


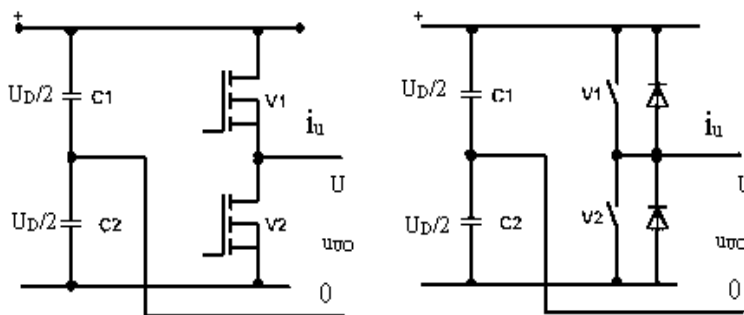
Рисунок 3. – Схема простейшего драйвера затвора полевого транзистора

Замедление работы полевого транзистора связано с наличием емкости между затвором и каналом, т.е. данная часть транзистора представляет собой конденсатор, который при подаче на него питания заряжается. Для ускоренного открывания транзистора следует за очень короткий промежуток времени на затвор управляемого транзистора мгновенно подать положительный потенциал. Это обеспечивается за счет открывания управляющего транзистора T1, при этом транзистор T2 должен быть закрыт. Закрывание полевого транзистора обеспечивается подачей на него низкого (отрицательного) потенциала через эмиттерно-коллекторный переход транзистора T2 при предварительно закрытом транзисторе T1. Транзисторы управления имеют различные проводимости, что позволяет включать одновременно их базы для получения управляющего сигнала от микропроцессора или другого управляющего устройства. Соединенные вместе эмиттеры этих транзисторов и являются водителями состояния затвора полевого или комбинированного выходного транзистора. Одновременно с этим необходимо отметить, что соединение эмиттеров с затвором выполнено последовательно через резистор R2, обладающий малым сопротивлением, однако достаточным для ограничения силы тока в процессе перезарядки емкости затвор–канал. Резистор R1 используется для ограничения тока в базовой цепи транзисторов и выходной цепи управляющего устройства.

Современные схемы инверторов и вентиляльных преобразователей работают на частоте переключения транзисторов в диапазоне от 5 до 20 кГц. Чем выше частота переключения, тем меньше пульсация тока электродвигателя и уровень шума в диапазоне работы органов слуха человека, однако повышение частоты чревато увеличением потери электроэнергии в электрическом двигателе за счет вихревых токов. Одновременно с этим растут потери электроэнергии в инверторе. При увеличении частоты растет количество переключений в единицу времени, что сокращает срок службы инвертора. Увеличение частоты работы инвертора при постоянном соотношении времени включенного и выключенного состояния приводит к повышению температуры переходов транзисторов, что в свою очередь снижает КПД инвертора. Перед конструкторами постоянно стоит вопрос в определении необходимой частоты для оптимальной работы инвертора. При реализации силовой части инвертора с драйвером управления в отличие от простейшей схемы в состав драйвера включаются дополнительные компоненты в виде устройств защиты и ограничителей. Для повышения качества функционирования и предотвращения выхода из строя инверторы подключены к системе охлаждения электромобиля. Управление охлаждением регулируется с использованием специального 12-вольтового насоса охлаждающей жидкости, управляемого сигналом ШИМ.

В инверторе используется обратная связь от внутренних датчиков положения вала электродвигателя и силы тока в его фазных обмотках, что обеспечивает плавную подачу питания с максимальной производительностью и эффективностью. Кроме этого, сигналы датчика положения вала электродвигателя позволяют изменять в инверторе угол фазы переменного тока в зависимости от требуемого уровня крутящего момента.

Принцип организации системы управления инвертора можно рассмотреть на примере простейшей однофазной мостовой схемы. Для пояснения ее работы применяется эквивалентная схема, состоящая из двух выключателей и двух диодов (рисунок 4). Данная схема широко применяется в различных преобразовательных схемах, в т.ч. в понижающем инверторе постоянного тока для питания сети низкого напряжения.



UD – напряжением промежуточного контура; $C1, C2$ – емкости конденсаторов; $uU0$ – амплитуда напряжения; i_u – действующая сила тока; U – напряжение; $V1, V2$ – ключи (в виде полевых транзисторов и в виде переключателей, поясняющих работу транзисторов)

Рисунок 4. – Принцип действия однофазной системы инвертора с приведением к эквивалентной схеме

В двухтактных преобразователях требуется деление питающего напряжения на две равные части. На сегодня наиболее часто используются следующие схемы: конденсаторная и трансформаторная. В трансформаторной схеме деление напряжения происходит за счет отвода средней точки провода в первичной обмотке трансформатора. Такая схема используется в схемах повышения и понижения напряжения.

Конденсаторная схема более простая и чаще применима для управления двигателями переменного тока. Напряжение питания схемы осуществляется от промежуточного контура, состоящего из двух последовательно-включенных конденсаторов $C1, C2$. Это напряжение называется напряжением промежуточного контура UD , который может иметь внутреннее сопряжение с высоковольтной аккумуляторной батареей. Отвод от средней точки конденсаторов позволяет получить среднее значение напряжения источника питания. В таком случае, если этот отвод принять за «ноль», верхнее плечо конденсаторов дает возможность получить положительное значение напряжения со значением $UD/2$, а нижнее – отрицательное со значением $UD/2$.

Для схемы характерны четыре различных состояния включения.

1. Переключатель $V1$ замкнут; переключатель $V2$ разомкнут. Выходное напряжение $uU0$ составляет $UD/2$;
2. Переключатель $V1$ разомкнут; переключатель $V2$ замкнут. Выходное напряжение $uU0$ составляет $-UD/2$;
3. Оба переключателя $V1$ и $V2$ замкнуты. Это состояние схемы недопустимо, т.к. схема является короткозамкнутой. В таком случае инвертор переходит в аварийный режим с полным прекращением работы.
4. Оба переключателя $V1$ и $V2$ разомкнуты. Это состояние используется в качестве режима покоя.

При эксплуатации используются только состояния схем 1 и 2. Приведенная схема является простым примером преобразователя постоянного тока в переменный. Выходное напряжение представляет собой сигнал прямоугольной формы, имеющий амплитуду $UD/2$. Питание подается на обмотки в полном объеме, однако такая схема имеет очень низкий КПД преобразования за счет дискретных включений обмоток. Кроме этого, происходит нагрев обмоток и повышение уровня шума в работе. Осциллограммы формируемых сигналов прямоугольной формы и сигнал с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) приведены на рисунке 5.

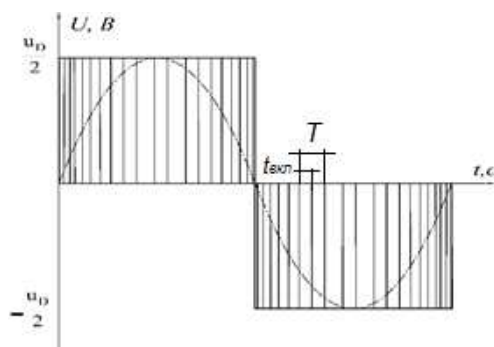


Рисунок 5. – Осциллограммы формируемых сигналов

В данной схеме высота выходного напряжения является фиксированной и может регулироваться только путем изменения напряжения промежуточного контура UD . Как видно из осциллограммы, амплитуда сигнала равна половине питающего напряжения $UD/2$.

Для получения правильной синусоидальной формы данный сигнал необходимо модулировать с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Суть данной модуляции заключается в подаче на обмотки силы тока, близкой к синусоидальному сигналу. Для реализации данной функции при постоянном питающем напряжении требуется изменять скважность сигнала в различных точках периода. Согласно рисунку 5, наибольшая ширина импульсов включения расположена в точках экстремумов, а наименьшая в переходах между полупериодами. Так реализуется плавность изменения тока в обмотках.

Если же сигнал представляет синусоидальную форму, то амплитуду выходного сигнала с частотой f можно вычислить, используя следующее выражение:

$$A = U_d \sin(2\pi ft + \phi), \text{ В}, \quad (9)$$

где $2\pi f$ – угловая частота;

ϕ – начальный угол поворота магнитного поля в обмотке, смещение точки отсчета от нулевого значения, рад.

Период определяется как величина, обратно пропорциональная частоте. Время включенного состояния соответствует ширине импульса при постоянной частоте сигнала. Частота выходного напряжения определяется тактовой частотой управляющего устройства. При увеличении частоты сигнала соответственно изменяются длительности периода и длительности включенного состояния, однако коэффициент заполнения остается постоянным.

Коэффициент заполнения – самый важный параметр сигнала ШИМ. Определить его можно по формуле

$$k_3 = \frac{t_{\text{вкл}}}{T}, \quad (10)$$

где $t_{\text{вкл}}$ – время включенного состояния;

T – период сигнала.

Наибольший коэффициент заполнения импульсов наблюдается в точках экстремумов синусоиды (см. рисунок 5), что показывает на наибольшую величину силы тока в этих точках. Значит, величина силы тока в цепи зависит от коэффициента заполнения. Проводя испытания, можно установить эмпирическую зависимость между этими параметрами.

$$I = f(k_3), \text{ А}. \quad (11)$$

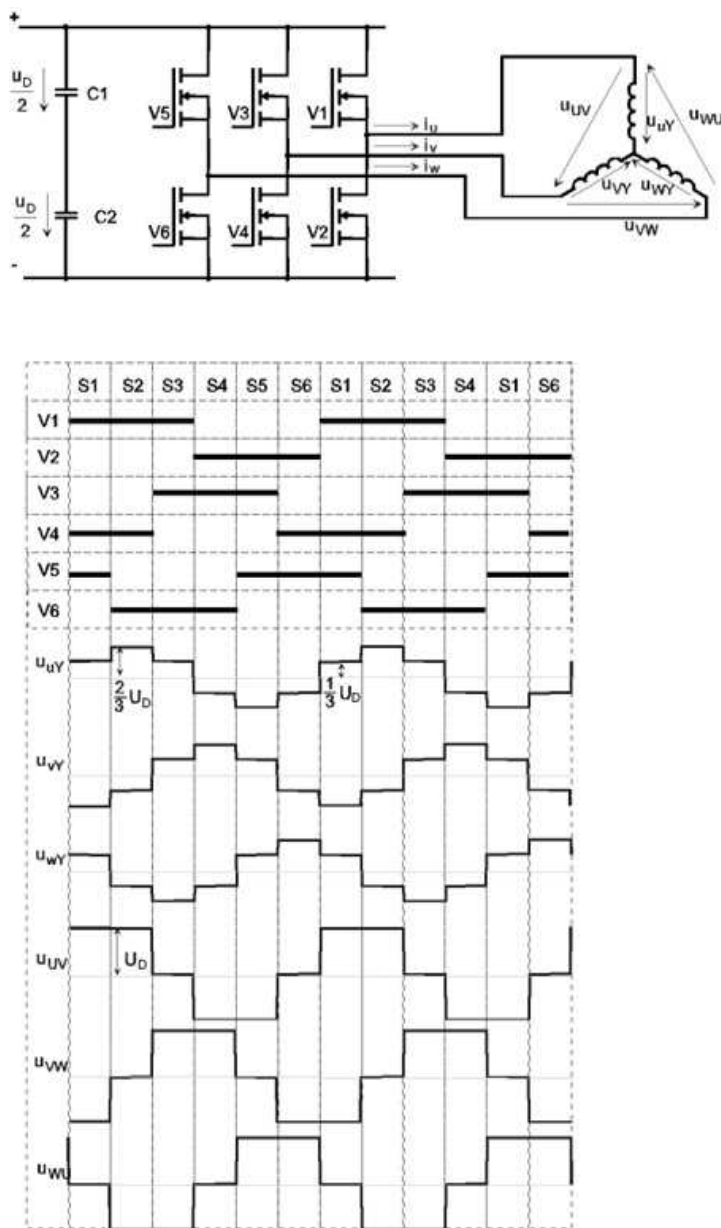
Подобным образом в схеме, состоящей из трех полумостов, можно синтезировать систему трехфазного переменного тока. Пример схемы и соответствующие выходные напряжения приведены на рисунке 6.

Каждый полумост отвечает за одну фазу. При положительных полуволнах пропускает верхний транзистор, при отрицательных – нижний.

Рассмотрим принцип образования вращательного электромагнитного поля в обмотках статора двигателя. Все периоды работы полупроводниковых приборов в выходном каскаде разбиты на 3 сектора, каждый сектор равен 60° угла поворота.

Начнем с первого транзистора фазы U . Он находится в открытом состоянии в течение первых трех секторов S1-S3, второй транзистор в мосту находится в противофазе и соответственно должен быть закрыт. Одновременно с этим в секторе S1 открыты транзисторы V4 и V5. В данном случае электрический ток протекает по пути от положительного входа через два открытых транзистора V1, V5 и соответственно через фазные обмотки статора U и W , а затем проходит через нулевой провод, фазу V и далее через транзистор V4 на отрицательный вывод питания. Следует обратить внимание на то, что в этот момент сила тока в цепи обмотки V равна сумме сил токов в обмотках U и W . Таким образом, магнитное поле статора в трех обмотках взаимодействует с обмотками ротора и поворачивает ротор на угол 60° . После перехода ротора происходит переключение секторов: V1 и V4 остаются в открытом состоянии, транзистор V5 закрывается, а транзистор V6 открывается. Это значит, что направление тока в обмотках U и V сохраняется, а в обмотке W меняется на противоположное. При этом сила тока в обмотке U будет соответствовать сумме сил токов в обмотках V и W . В результате взаимодействия магнитных полей ротор повернется еще на 60° , а система коммутации перейдет в следующий сектор: V1 и V6 остаются в открытом состоянии, транзистор V4 закрывается, а транзистор V3 открывается. Это значит, что направление тока в обмотках U и W сохраняется, а в обмотке V меняется на противоположное. При этом сила тока в обмотке W будет соответствовать сумме сил токов в обмотках V и U . В результате взаимодействия магнитных полей ротор повернется еще на 60° , а система коммутации перейдет в следующий сектор. Транзистор V1 закрывается и открывается V2 и весь процесс повторяется. Однако все изменения будут происходить зеркально всем пунктам, описанным ранее, до тех пор, пока не откроется транзистор V1. Приведенный рисунок отражает про-

цесс формирования линейных напряжений инвертора, которые могут быть определены путем графического сложения фазных значений напряжения.



U_{UY} – линейное напряжение между фазами U и Y; UVY – линейное напряжение между фазами V и Y; UWY – линейное напряжение между фазами W и Y; UUV – линейное напряжение между фазами U и V; UVW – линейное напряжение между фазами V и W; UWU – линейное напряжение между фазами W и U; V1...V6 – транзисторные ключи; S1...S6 – периоды замкнутого или разомкнутого состояния транзисторов; i_u, i_v, i_w – действующие значения сил фазных токов в фазах U, V и W соответственно

Рисунок 6. – Трехполумостовая схема и соответствующие выходные напряжения

Считывание сигнала с выходных каскадов инвертора позволяет определять положение магнитного поля в статоре электрического двигателя, что может быть параметром для определения скольжения электродвигателя. Преобразуя формулу (9), получаем начальный угол поворота магнитного поля в обмотке.

Данная зависимость позволяет по величине напряжения отследить параметр «угловое положение магнитного поля»:

$$\phi = \arcsin \frac{A}{U_d} - 2\pi ft, \text{ рад.} \tag{12}$$

При сравнения положения магнитного поля с физическим положением ротора появляется возможность определить параметр «абсолютное скольжение» ротора с высокой точностью, который позволяет выявлять высокую чувствительность и даже при незначительных нагрузках зависит от величины крутящего момента. Параметр «крутящий момент» определяется по формуле

$$M = f(\phi), \text{ Нм.} \quad (13)$$

Параметр «относительное скольжение ротора асинхронного двигателя» – относительная разность скоростей вращения ротора и изменения переменного магнитного потока, создаваемого обмотками статора двигателя переменного тока, можно рассчитать как

$$S = \frac{f - n}{f}, \quad (14)$$

где f – частота вращения магнитного поля статора;
 n – частота вращения ротора электродвигателя.

Известно, что в режиме холостого хода скольжение стремится к 0, а при увеличении нагрузки оно увеличивается. Следовательно, параметр «относительное скольжение ротора» с достаточной точностью отражает нагрузку на валу электрического асинхронного двигателя при воздействии большого крутящего момента. Параметр «крутящий момент» определяется как

$$M = f(S), \text{ Нм.} \quad (15)$$

Заключение. Рассмотрена схема электромобиля с описанием основных компонентов. Проведен расчет поперечного сечения, диаметров и массы проводников высоковольтной сети электромобиля в зависимости от величины напряжения. Также рассмотрена силовая часть инвертора с драйвером управления спецификой силовых ключей. Представлен принцип организации трехфазного тока с использованием широтно-импульсной модуляции и функционирования инвертора. Определен перечень диагностических параметров для мониторинга технического состояния и дистанционного диагностирования электромобилей.

Выводы:

1. Параметр «падение напряжения» и соответствующий ему параметр «сила тока» могут быть считаны непосредственно с высоковольтных проводов электромобиля, т.к. высоковольтный провод определенной сечения и определенной длины может быть использован в качестве шунта.
2. Параметр «абсолютное скольжение ротора электродвигателя» находят по разности физического положения ротора и положения магнитного поля статора путем считывания сигнала с выходных каскадов инвертора. По абсолютному скольжению ротора можно с высокой точностью определить параметр «крутящий момент» электрического асинхронного двигателя электромобиля при небольших нагрузках.
3. Параметр «относительное скольжение ротора электродвигателя» вычисляется по разности частот вращения магнитного поля статора и вращения ротора путем считывания сигнала с выходных каскадов инвертора. По относительному скольжению ротора можно с достаточной точностью определить параметр «крутящий момент» электрического асинхронного двигателя при больших нагрузках электромобиля.
4. Все вышеперечисленные параметры могут быть использованы для мониторинга высоковольтных сетей и дистанционного диагностирования электромобиля после проведения предварительных испытаний и расчета коэффициентов соответствующих эмпирических зависимостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савич Е.Л. Легковые автомобили: учеб. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРАМ, 2022. – 758 с.
2. Савич Е.Л. Устройство автомобилей. Двигатели: учеб. пособие. – Минск: Выш. шк., 2019. – 334 с.
3. Гурский А.С. Анализ параметров высоковольтных аккумуляторных батарей электробусов с целью создания алгоритмов их общего и поэлементного диагностирования с применением телематических систем // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. / редкол.: С.В. Харитончик (гл. ред.) и др. – Минск: БНТУ, 2022. – Вып. 4. – С. 12–20.
4. Уланов, А.Г. Теория наземных транспортных средств. Тяговый расчет электромобиля: учеб. пособие. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2018. – 389 с.
5. Schmidt Torsten. Pojazdy hybrydowe i elektryczne w praktyce warsztatowej. Budowa, dzialanie, podstawy obslugi. – Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2020. – 172 s .

REFERENCES

1. Savich, E.L. (2022). *Legkovye avtomobili*. Moscow: INFRAM. (In Russ.)
2. Savich, E.L. (2019). *Ustroistvo avtomobilei. Dvigateli*. Minsk: Vysheishaya shkola. (In Russ.)

3. Gurskii, A.S. (2022). Analiz parametrov vysokovol'tnykh akkumulyatornykh batarei elektrobusev s tsel'yu sozdaniya algoritmov ikh obshchego i poelementnogo diagnostirovaniya s primeneniem telematicheskikh system [Analysis of parameters of high-voltage batteries of electric buses in order to create algorithms for their general and element-by-element diagnostics using telematics systems]. In S.V. Kharitonchik (Ed.), *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii* [Transport and transport systems: design, operation, technologies: collection of scientific articles], (4), 12–20. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Ulanov, A.G. (2018). *Teoriya nazemnykh transportnykh sredstv. Tyagovyi raschet elektromobilya*. Chelyabinsk: Izdatel'skii tsentr YuUrGU. (In Russ.)
5. Schmidt, T. (2020). *Pojazdy hybrydowe i elektryczne w praktyce warsztatowej. Budowa, dzialanie, podstawy obslugi*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. (In Polish)

Поступила 18.04.2023

PARAMETERS OF THE COMPONENTS OF THE HIGH VOLTAGE NETWORK OF ELECTRIC CARS AND THEIR CALCULATION

A. GURSKY, E. SAVICH
(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article considers the components of high-voltage networks of electric cars and their relationship with the components of low-voltage networks, as well as the methods of their conversion. The dependence of the weight and size parameters on the voltage of the electric car high-voltage network is shown. The calculations showed the possibility of using the "voltage drop" parameter in the wires to control the current strength without using additional shunts. The distinctive features of the output power switches and the inverter driver circuit are shown. The operation of a single-phase bridge circuit with four different switching states is analyzed. The principle of organizing a sinusoidal form using pulse-width modulation is shown, with a given oscillogram of the generated signal. The synthesis of a three-phase alternating current system is shown. The parameters of the absolute and relative slip of the motor rotor are determined by reading the rotational speed and position of the motor rotor and the rotating magnetic field of the stator when reading from the output stages of the inverter.

Keywords: electric car, high-voltage network, parameters, voltage, resistance, electric motor, inverter, high-voltage storage battery, phase.