

Бу Нгок Зан,
Кандидат технических наук,
UNETI – Экономико-технологический
университет промышленности, г. Ханой, Вьетнам

То Ван Бинь, Магистрант,
UNETI – Экономико-технологический
университет промышленности, г. Ханой, Вьетнам

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ В ЭЛЕКТРОМОБИЛЕ

Аннотация: В данной статье основное внимание уделяется изучению компонентов сети высокого напряжения в электромобилях и их взаимосвязи с сетью низкого напряжения с целью оптимизации производительности и безопасности энергосистемы путем анализа падения напряжения в проводнике для контроля тока без использования шунтирующий резистор, использующий широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) для управления инвертором.

Ключевые слова: Электромобиль; падение напряжения; шунтирующие резисторы; силовой ключ; инвертор

Каждый электромобиль представляет собой систему, состоящую из всех отдельных частей и систем, выполняющих определенные функции. В электромобилях используется сеть низкого напряжения 12 В, которая питает все системы электромобиля, например, в традиционных автомобилях, питающихся от аккумуляторов и инверторов постоянного тока, в гибридных автомобилях иногда используется классический генератор низкого напряжения и сеть высокого напряжения, обычно от 400 до 800 В., иногда выше, чтобы обеспечить большую электрическую мощность для системы привода [1,2].

Это исследование направлено на расчет параметров сетей высокого напряжения с целью оптимизации производительности и обеспечения безопасности системы на основе основных электрических принципов и современных методов управления электропитанием и контроля электрической энергии. Тщательно учитываются такие ключевые параметры, как падение напряжения, сопротивление в проводах, а также характеристики силового ключа и схемы инвертора. В частности, исследования сосредоточены на использовании изолированных управляемых транзисторов (IGBT) и полевых транзисторов (MOSFET) для достижения оптимальных характеристик в сетях высокого напряжения.

Важнейшей частью электромобиля является электронный блок управления, который питается от низковольтной сети автомобиля и активируется электрическим замком зажигания для координации высоковольтной системы. Электронный контроллер обменивается данными с датчиками и исполнительными устройствами по протоколу CAN (Controller Area Network) [3,4] и управляет инвертором с помощью бинарно-импульсно-кодовой модуляции, реализуя все присущие электромобилям функции. В зависимости от характеристик движения электромобиля режим электродвигателя или генератора реализуется путем включения инвертора.

Для реализации необходимой частоты вращения ротора и крутящего момента, создаваемого электродвигателем, электронный блок управления определяет необходимую потребляемую мощность от высоковольтной батареи на основе сигналов различных датчиков электроэнергии автомобиля [4]. В высоковольтной сети основным потребителем является высоковольтный трехфазный инвертор, который, в свою очередь, подает питание на систему привода. При фиксированном уровне мощности более высокое напряжение позволяет уменьшить ток, что позволяет передавать мощность при относительно небольшом сечении



провода. Влияние напряжения на вес и габариты определяют посредством процесса расчета энергии по классической формуле электрической энергии, передаваемой от системы накопления энергии к электроприводу [5].

В электроприводах принято, что потери напряжения по длине проводника не должны быть более 5%. При этом падение напряжения ΔU на цепи не может быть больше.

$$\Delta U = 0.05U, V. \quad (1)$$

Диаметр D проводника определяется как:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}, \text{ мм.} \quad (2)$$

$$m = \rho_m \cdot L \cdot S, \text{ кг.} \quad (3)$$

Где S и L – сечение и длина проводника соответственно, ρ_m – плотность меди

Поскольку удельное сопротивление ρ медной жилы равно $0,0175 \Omega \cdot \text{м}$, длина провода, соединяющего высоковольтную батарею с инвертором, – 2 м , количество жил – 2 , плотность меди $\rho_m = 8900 \text{ кг/м}^3$, поэтому все значения параметров для разных уровней напряжения при передаче электроэнергии одинаковой мощности рассчитываются по приведенным формулам и сводятся в таблицу 1.

Таблица 1.

Зависимость диаметра, массы и падения напряжения проводника от напряжения передачи.

U (В)	m (кг)	D (мм)	ΔU (В)
12	20.767	27.253	0.6
24	5.192	13.626	1.2
36	2.307	9.084	1.8
48	1.298	6.813	2.4
60	0.831	5.451	3
72	0.577	4.524	3.6
84	0.424	3.893	4.2
96	0.324	3.401	4.8
108	0.256	3.028	5.4
200	0.075	1.635	10
300	0.033	1.090	15
400	0.019	0.818	20
500	0.012	0.654	25
600	0.008	0.545	30
700	0.006	0.467	35
800	0.005	0.409	40

Сравнивая габаритные размеры проводника при напряжении 12 В и 800 В , получаем: диаметр провода больше в $27,253/0,409=66,6$ раза, а масса больше в $20,767/0,005=4153$ раза. Результаты расчетов подтверждают, что увеличение тока требует увеличения сечения кабеля S , которое фактически ограничено стоимостью, массой и пространством транспортного средства.

Из таблицы 1 мы видим, что при постоянном энергопотреблении величина падения напряжения пропорциональна напряжению передачи. После преобразования формулы (3) получим формулу для расчета падения напряжения в цепи по закону Ома следующим образом:

$$\Delta U = R \cdot I, V. \quad (4)$$

Если сопротивление R постоянно, напряжение пропорционально току в проводе. Высоковольтный провод определенного сечения и длины можно использовать в качестве



шунта для определения падения напряжения по силе тока в цепи. Этот метод, учитывающий температурные погрешности, позволяет с высокой точностью контролировать ток в проводе.

$$I = f(\Delta U), \text{ А.} \quad (5)$$

Для работы инвертора в режиме электродвигателя инвертор получает питание постоянного тока от высоковольтной батареи и преобразует его в трехфазный переменный ток с различной частотой и амплитудой выходного сигнала. В режиме генератора инвертор осуществляет обратное преобразование в виде выпрямления и фильтрации напряжения на основе трехфазной полумостовой схемы с изолированными управляемыми транзисторами (БИТЗ) или полевыми транзисторами (МОП). МОП имеют преимущества простоты, низкой стоимости и высокой скорости срабатывания, но имеют недостаток, заключающийся в том, что ток потерь из-за внутреннего сопротивления канала удваивается, это ограничение преодолевается за счет использования транзистора в сочетании с БИТЗ [6]. Эквивалентная схема БИТЗ упрощена, как показано на рисунке 1.

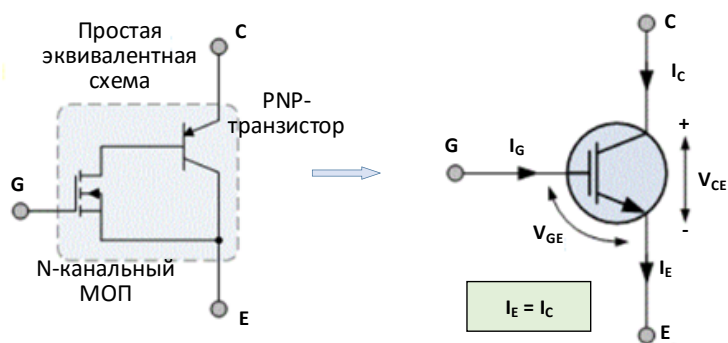


Рисунок 1. Простая эквивалентная схема БИТЗ.

Сочетание полевых транзисторов и биполярных транзисторов позволяет получить наилучшие линейные параметры изменения сопротивления. Суть работы драйвера заключается в увеличении скорости открытия и закрытия транзистора, так как при увеличении процесса открытия и закрытия выделяется огромная тепловая энергия, которая может привести к тепловому пробую транзистора. Простейшая схема управления выводом G на полевом транзисторе изображена на рисунке 2.

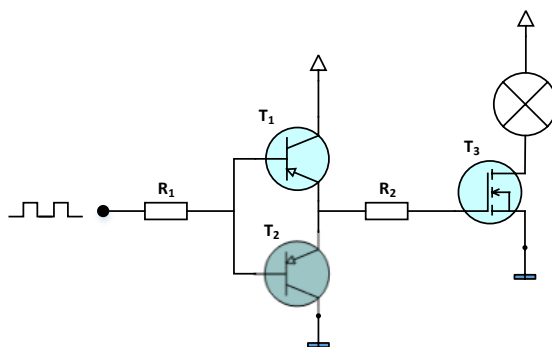


Рисунок 2. Схема управления G-выводом простого полевого транзистора.

Современные схемы инверторов и переключающих ламп работают на частотах переключения транзисторов от 5 до 20кГц. Чем выше частота коммутации, тем меньше пульсация тока электродвигателя и меньше уровень шума, однако увеличение частоты приведет к увеличению потерь мощности в электродвигателе, а также увеличится число указанных выше



моментов переключений в единицу времени., сокращая срок службы инвертора, а также приводя к повышению температуры в точках перехода, тем самым снижая производительность инвертора. Поэтому определение частоты, необходимой для оптимальной работы инвертора, очень важно. Чтобы улучшить качество работы и избежать сбоев, инвертор подключается к системе охлаждения электромобиля с помощью специального насоса охлаждающей жидкости на 12В, управляемого сигналом широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Привод использует обратную связь от внутреннего положения вала двигателя и измерения фазного тока для обеспечения плавной подачи мощности с максимальной эффективностью и позволяет изменять фазовый угол переменного тока в приводе в зависимости от требуемого уровня крутящего момента. Организационный принцип системы управления инвертором можно рассмотреть на примере простой однофазной мостовой схемы. Для пояснения его работы используется эквивалентная схема, состоящая из двух ключей и двух диодов (рис. 3). Данная схема широко используется в различных схемах преобразования в понижающих инверторах постоянного тока для питания низковольтных сетей.

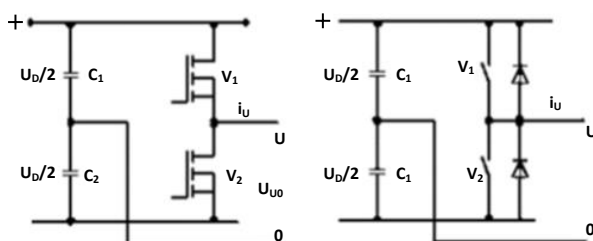


Рисунок 3. Эквивалентная схема системы управления однофазным инвертором

Двухтактный преобразователь требует деления питающего напряжения на две равные части. Сегодня наиболее часто используемые схемы – это конденсаторы и трансформаторы. В схеме трансформатора деление напряжения происходит путем деления первичной обмотки трансформатора пополам. Эта схема используется в схемах повышения и понижения напряжения.

Приведенная выше схема представляет собой простой пример преобразователя постоянного тока в переменный. Выходное напряжение представляет собой прямоугольный импульсный сигнал амплитудой $U_D/2$. На катушки подается достаточная мощность, но схема имеет очень низкую эффективность преобразования из-за дискретных соединений катушек. Кроме того, катушка нагревается и увеличивается уровень шума при работе. Осциллограмма сформированного прямоугольного импульса и сигнала ШИМ изображена на рисунке 4.

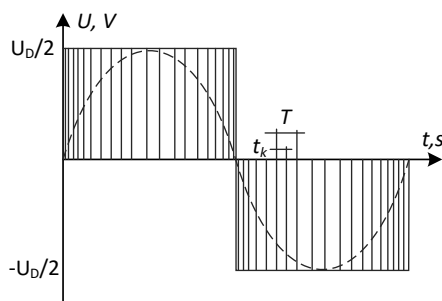


Рисунок 4. Осциллограф сформированного сигнала

В этой схеме амплитуда выходного напряжения фиксирована и ее можно регулировать только путем изменения напряжения промежуточной цепи U_D . Как видно на осциллографе, амплитуда сигнала составляет половину напряжения питания $U_D/2$. Для получения



синусоидальной формы этот сигнал необходимо промодулировать с помощью широтно-импульсной модуляции. Для выполнения этой функции при постоянном напряжении питания необходимо варьировать скважность сигнала в разных точках. Согласно рисунку 4, наибольшая ширина импульсов переключения приходится на крайние точки, наименьшая – на точки перехода между полупериодами. Это обеспечивает плавное изменение тока в катушке. Амплитуда выходного синусоидального сигнала с частотой f рассчитывается по следующему выражению:

$$U = U_D \sin(2\pi ft + \phi), \text{ В.} \quad (6)$$

В котором: $2\pi f$ – угловая частота; ϕ – начальный фазовый угол магнитного поля в катушке, рад.

Время в активном состоянии соответствует ширине импульса при постоянной частоте сигнала. Частота выходного напряжения определяется тактовой частотой устройства управления. При увеличении частоты сигнала соответственно изменяется период времени в активном состоянии, но коэффициент заполнения остается постоянным. Это важнейший параметр ШИМ-сигнала, который можно определить по формуле:

$$k_l = \frac{t_k}{T}, \quad (7)$$

В котором: t_k – время в активированном состоянии; T – период сигнала.

Наибольший коэффициент заполнения импульса наблюдается в крайних точках синусоиды (рисунок 4), где и указывается наибольшая сила тока. Это означает, что величина тока в цепи зависит от рабочего цикла. Проведя эксперименты, можно установить эмпирическую связь между этими параметрами.

$$I = f(k_l), \text{ А.} \quad (8)$$

В результате проведенного исследования определены и детально рассчитаны параметры сети высокого напряжения в электромобилях, в том числе сечение, диаметр и масса проводов в зависимости от величины напряжения. В ходе исследования также были проанализированы и оптимизированы характеристики силового ключа и схемы управления инвертором, включая использование транзисторов БТИЗ и МОП для повышения эффективности преобразования и снижения потерь мощности. Представлен принцип организации трехфазного тока с использованием метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и работы инвертора. Определен перечень диагностических параметров для контроля технического состояния и дистанционной диагностики электромобилей.

Список литературы:

1. Савич Е.Л. Легковые автомобили: учеб, перераб. и доп. – М.: ИНФРАМ, – 2-е изд., 2022. – 758 с.
2. Klaus Specht, Martin Gall, Georg Scheidhammer. From 400 to 800 V – Effects on the High-voltage On-board Electrical System. ATZ Electron Worldw 14, – 2019 – С. 42 -45.
3. Савич Е.Л. Устройство автомобилей, Двигатели: учеб. Пособие, Минск: Выш. шк., 2019. – 334 с.
4. 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. – Вып. 4. – 2022 – С. 12–20.
5. Уланов А.Г. Теория наземных транспортных средств, Тяговый расчет электромобиля: учеб. пособие. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2018. – 389 с.
6. Schmidt Torsten. Pojazdy hybrydowe i elektryczne w praktyce warsztatowej. Budowa, działanie, podstawy obsługi, Wydawnictwo: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Data 1, (In Polish), 2020. – 172 s.

