

Электроэнергетическая система гибридного квадроцикла

А. А. Ким¹, А. Н. Лукичев², С. А. Гринишена³, Д. П. Михайлов⁴
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹ aakim@stud.etu.ru, ² anlukichev@etu.ru, ³ classicheartinside18@gmail.com, ⁴ dpmikhailov@etu.ru

Аннотация. Представлена электроэнергетическая система гибридного квадроцикла. Рассматриваются возможность применения различных источников электрической энергии, а также энергоэффективность применения этих источников. Применена микроконтроллерная система управления. Описана возможность модернизации электроэнергетической системы.

Ключевые слова: гибридное транспортное средство, микроконтроллерная система управления, электроэнергетическая система, энергоэффективность

I. ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемым гибридный квадроцикл по своей сути является автономным транспортным средством. Автономное транспортное средство – это транспортное средство, которое может самостоятельно работать и выполнять необходимые функции без какого-либо вмешательства человека. Автономные системы известны сегодня во многом благодаря последним достижениям из автомобильной промышленности. Автоматизированные системы различной степени автономности являются составной частью будущих разработок и планов развития многих областей деятельности.

Автономные транспортные средства нашли широкое применение в таких областях как: строительство, сельское хозяйство, поисково-спасательные операции, пожаротушения и т. д. Современные автономные транспортные средства имеют большое количество датчиков, вычислительной техники, специального оборудования, которым для функционирования необходима электрическая энергия [1].

В данной статье рассматривается электроэнергетическая система гибридного квадроцикла. Квадроцикл с электродвижением и элементами беспилотных автономных систем представлен на рис. 1.



Рис. 1. Квадроцикл

Основная задача электроэнергетической системы – производить электроэнергию и доставлять ее потребителям. Автономные системы получают энергию отдельно от основной сети. В качестве источников электроэнергии могут выступать различные генераторы способные работать на разных видах газообразного либо жидкого топлива, на энергии солнца или ветра.

На рис. 2 приведена схема привода транспортного средства.

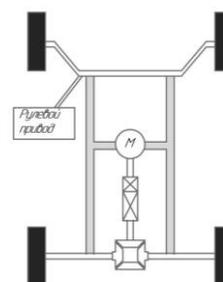


Рис. 2. Привод квадроцикла

Как видно из рис. 2 транспортное средство имеет задний привод. Источниками электрической энергии квадроцикла являются дизель-генератор и аккумуляторные батареи. В качестве потребителей электрической энергии выступают компьютер, бесколлекторный синхронный двигатель постоянного тока с постоянными магнитами на роторе, электропривод тормоза, светотехника, рулевой привод, микроконтроллер, а также различные датчики.

II. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

A. Потребители электрической энергии

Основным потребителем электрической энергии в гибридном квадроцикле является электродвигатель.

Из рис. 2 видно, что привод квадроцикла осуществляется с помощью электрического двигателя типа BLDC, иначе бесколлекторный двигатель постоянного тока с постоянными магнитами. Мощность двигателя – 1кВт. Также применяются редуктор и дифференциал для привода квадроцикла. Электрический двигатель типа BLDC используется по следующим причинам:

- отсутствие щеточно-коллекторного узла;
- долгий срок службы;
- лучше характеристики и эффективность (КПД около 90 %);
- более компактны;

- достаточно низкий уровень шума при работе по сравнению с другими двигателями того же номинала;
- нет механизмов, требующих регулярного обслуживания.

Однако у такого электродвигателя имеются и недостатки:

- более сложная система управления;
- высокая цена из-за дорогих комплектующих (например, постоянные магниты);
- нужны дополнительные коммутационные устройства для работы (коммутаторы, энкодеры).

Еще одним из основных потребителей является компьютер. Он используется для отладки и контроля работы всех устройств в квадроцикле.

Также в состав квадроцикла входят такие потребители, как: электрогидравлический тормоз, рулевой привод, светотехника, датчики и микроконтроллерные системы нижнего уровня.

В. Источники электрической энергии

Источниками электрической энергии выступают дизель-генератор и аккумуляторные батареи. Источники электрической энергии должны иметь достаточную мощность для функционирования нужных потребителей электрической энергии.

В рассматриваемом квадроцикле суммарная мощность потребителей электрической энергии составляет 2,4 кВт. Для обеспечения такой мощности в электроэнергетической системе применяется дизель-генератор мощностью 5 кВт. Дизель-генератор был выбран такой мощности специально, т.к. это позволит модернизировать электроэнергетическую систему, без значительных затрат, т.е. система имеет запас по мощности [2]. Данный дизель-генератор имеет возможность ручного и автоматического запуска. Ручной запуск осуществляется проворачиванием ключа в замке зажигания, автоматический – подача управляющего сигнала за электромеханическое реле.

Аккумуляторная батарея – устройство, предназначенное для накопления энергии, с дальнейшим использованием этой энергии. В аккумуляторной батарее энергия химической реакции преобразуется в электрическую энергию и наоборот. В настоящее время существует много различных вариантов аккумуляторных батарей.

В рассматриваемом квадроцикле используются аккумуляторные батареи формата AGM (Absorbent Glass Mat). Аккумуляторы AGM чрезвычайно устойчивы к вибрации, полностью герметичны, не проливаются и не требуют обслуживания [3]. Также у AGM значительный срок службы. Аккумуляторы AGM предназначены для устранения движения электролита, удерживая его на месте, сокращения затрат на обслуживание аккумулятора и, как утверждается, среди других преимуществ они обладают большей мощностью зарядки.

Аккумуляторная батарея для питания потребителей таких как компьютер, рулевой привод, тормоза и т.д. состоит из двух параллельно соединенных батарей напряжением 12 В и емкостью по 100 А*ч. В результате такого соединения получается аккумуляторная батарея

напряжением 12 В и емкостью 200 А*ч. Разрядные характеристики одного аккумулятора представлены на рис. 3.

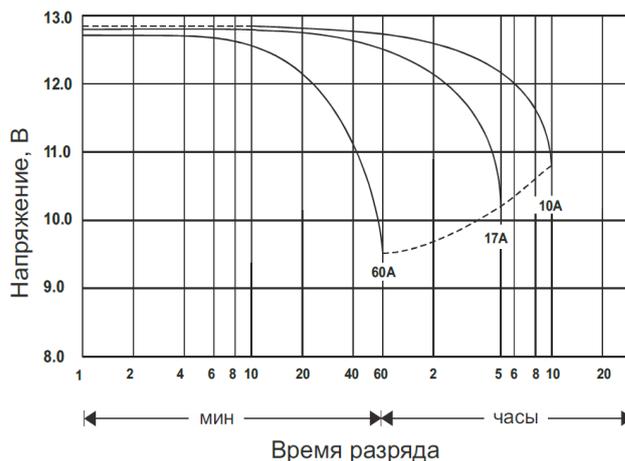


Рис. 3. Разрядные характеристики аккумуляторной батареи

Тяговая аккумуляторная батарея состоит из нескольких последовательно соединенных аккумуляторов. Такое соединение позволяет получить в сумме желаемое напряжение. При последовательном соединении батареи, представленном на рис. 4, с одинаковым напряжением и емкостью в ампер-часах подключаются для увеличения напряжения всей сборки.

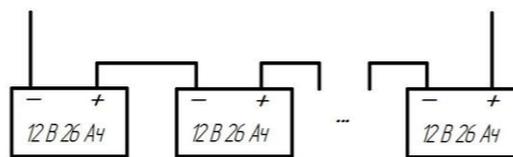


Рис. 4. Последовательное соединение аккумуляторных батарей

Положительный вывод первой батареи подключается к отрицательной клемме второй батареи и так далее, пока не будет достигнуто желаемое напряжение. Выходное напряжение — это сумма всех напряжений батарей, сложенных вместе, в то время как конечные ампер-часы остаются неизменными. Таким образом, для получения 60 В на выходе последовательно соединенных АКБ были соединены 5 аккумуляторных батарей напряжением 12 В.

Аккумуляторы технологии AGM, что и предыдущие. Емкость каждого составляет 26 А*ч. При таком соединении в результате получается АКБ 60 В и 26 А*ч.

С. Структурная схема электроэнергетической системы

В гибридном квадроцикле имеются два источника электрической энергии, потребители как постоянного, так и переменного тока. Отсюда следует, что структурная схема системы должна включать в себя блоки преобразования электрической энергии.

Структурная схема электроэнергетической системы квадроцикла, представленная на рис. 5, где обозначено: ИЭЭ – источники электрической энергии, ПК – компьютер, ЭД BLDC – электродвигатель, ДН – датчик напряжения, АКБ – аккумуляторная батарея, УПС – устройство переключения сети, ТБ – топливный бак, ДУТ – датчик уровня топлива, СЭП – система электропривода, СУ – система управления.

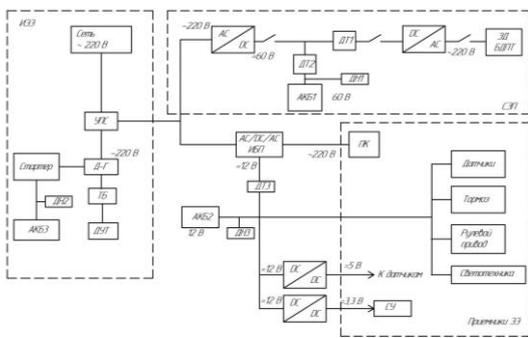


Рис. 5. Структурная схема ЭЭС

Для работы таких устройств как тормоз, рулевой привод нужно питание 12 В постоянного напряжения, а для работы микроконтроллера необходимо питание 3,3 В. Для достижения этих уровней напряжения используются DC/DC преобразователи. DC/DC преобразователи – это электрические устройства, предназначенные для преобразования одного уровня постоянного напряжения в другой уровень постоянного напряжения.

Схема на рис. 5 содержит датчики уровня топлива, датчики тока, датчики напряжения. Все эти датчики нужны для того, чтобы система управления получала всю необходимую информацию о состоянии электроэнергетической системы. В системе электропривода имеются коммутационные устройства. Они выполняют как функцию коммутации, так и защитную функцию.

Электрическую энергию переменного тока система получает двумя способами:

- от сети;
- от дизель-генератора.

Для экономии ресурсов дизель-генератора был введен режим работы от сети. Данный режим позволяет производить настройку и отладку транспортного средства не включая дизель-генератор, а также этот режим обеспечивает необходимую подзарядку аккумуляторных батарей. Для переключения между сетью и дизель-генератором стоит специальное устройство, которое обозначено как «устройство переключения сети». Устройство переключения сети состоит из коммутационной аппаратуры микроконтроллерной системы управления. В зависимости от ситуации с помощью микроконтроллера осуществляется выбор того или иного режима работы электроэнергетической системы.

Запуск дизель-генератора осуществляется с помощью стартера. Стартер получает электрическую энергию от своей аккумуляторной батареи.

Контроль топлива в дизель-генераторе осуществляется с помощью датчика уровня топлива. Сигнал с датчика поступает в микроконтроллер.

D. Система управления

Получение информации о состоянии электроэнергетической системы происходит с помощью различных датчиков. Информация из датчиков поступает в систему управления. В свою очередь, система управления на основе полученных данных управляет электроэнергетической системой. Например, с помощью датчика уровня топлива определяется информация об

оставшемся количестве топлива. Если топливо закончилось, то электроэнергетическая система будет получать электроэнергию от аккумуляторных батарей.

Управление электродвигателем осуществляется с помощью системы электродвижения. Для корректного управления необходимо знать параметры электродвигателя в текущий момент времени. Для этого в качестве обратной связи присутствуют датчики напряжения, тока и температуры.

Итак, все необходимые сведения о системе поступают в систему управления. Система управления предназначена для полной автоматизации любой электростанции. Система управляет электроэнергией таким образом, чтобы максимально предотвратить отключение электроэнергии, и минимизировать расход топлива. Система предназначена для дистанционного управления работой дизель-генератора, автоматических выключателей, а также некоторых потребителей.

Система управления выполняет следующие автоматические функции:

- запуск / остановка дизель-генератора;
- контроль потребителей;
- предотвращение отключения электроэнергии;
- дистанционный запуск и остановку дизель-генератора;
- переключение с дизель-генератора на аккумуляторные батареи;
- измерение параметров: U, I.

Система управления получает информацию о состоянии системы от напряжения аккумуляторных батарей стартера, до потребляемого тока аккумуляторной батареи электродвигателя. Зная параметры системы в определенный момент, можно судить о многих вещах. Например, прогнозирование оставшегося времени автономной работы транспорта. Для этого нужно знать следующее: оставшееся топливо в топливном баке дизель-генератора и текущую емкость аккумуляторной батареи. Оставшееся топливо легко определяется с помощью датчика уровня топлива. На выходе датчика – напряжение пропорциональное уровню топлива. А текущая емкость аккумуляторной батареи определяется через напряжение и ток аккумулятора.

Для защиты от перегрузки и короткого замыкания присутствует автоматический выключатель в цепи постоянного тока для электродвигателя. Когда автомат срабатывает система управления получает сигнал. Исходя из этого система управления отключает дизель-генератор и работает в режиме ожидания. Для обеспечения защиты потребителей используются плавкие предохранители и автоматические выключатели.

Система управления осуществляет следующие режимы работы:

- режим настройки и отладки: электроэнергетическая система получает электрическую энергию от сети;
- режим работы от дизель-генератора: электроэнергетическая система получает электрическую энергию от дизель-генератора.

данный режим является основным режимом работы электроэнергетическая система;

- режим работы от аккумуляторных батарей: электроэнергетическая система получает электрическую энергию от аккумуляторных батарей. Данный режим включается тогда, когда не может работать дизель-генератор, например, когда отсутствует топливо;
- режим ожидания.

Время автономной работы в режиме работы от аккумуляторных батарей определяется исходя из емкости самих аккумуляторов и соответствующих потребителей. Для расчета емкость аккумуляторов удобно перевести из А*ч в Вт*ч. Емкость тяговой аккумуляторной батареи определяется по (1).

$$200A \cdot ч = 200A \cdot ч \cdot 12B = 2400Bm \cdot ч \quad (1)$$

Емкость тяговой аккумуляторной батареи определяется по (2).

$$26A \cdot ч = 26A \cdot ч \cdot 60B = 1560Bm \cdot ч \quad (2)$$

Тогда минимальное время автономной работы определяется по (3) и (4).

$$t_{26.4ч} = \frac{1560Bm \cdot ч}{1000Bm} = 1,56ч \quad (3)$$

$$t_{200.4ч} = \frac{2400Bm \cdot ч}{1400Bm} = 1,71ч \quad (4)$$

Таким образом, время автономной работы квадроцикла в режиме работы от аккумуляторных батарей составляет как минимум 1,56 ч. За это время транспортное средство должно пополнить топливные ресурсы дизель-генератора, если это возможно, или же припарковаться в безопасном месте с дальнейшим функционированием в режиме ожидания.

Е. Алгоритм работы системы управления

Управление электроэнергетической системой автономного транспортного средства осуществляется с помощью микроконтроллера STM32F446RE. Микроконтроллеры фирмы ST широко распространены и вследствие этого на данный момент имеются различные среды разработки, которые облегчают весь путь конфигурации и настройки микроконтроллеров.

В приоритете электроэнергетическая система квадроцикла получает питание от сети, т.е. от розетки. Данный режим позволяет снизить расходы ресурсов дизель-генератора и аккумуляторных батарей. После отключения от сети электроэнергетическая система получает питание от аккумуляторных батарей. Данный режим не является основным, т.к. время автономной работы электроэнергетической системы при полной загруженности ограничивается 1,5 ч. Основная функция данного режима является осуществления безопасного перехода от режима питания от сети к режиму питания от дизель-генератора. Также благодаря этому режиму осуществляется режим ожидания.

Режим ожидания – режим работы электроэнергетической системы квадроцикла, когда питание от сети не доступно, а дизель-генератор не может вырабатывать электрическую энергию (например, отсутствие топлива в топливном баке). Система посылает сигнал на верхний уровень управления и

транспортное средство останавливает выполнение своей основной задачи, перемещаясь в безопасное место с последующим ожиданием операторов.

Режим работы от дизель-генератора – основной режим работы после сети. Электроэнергетическая система получает электрическую энергию от дизель-генератора. Для того, чтобы запустить дизель-генератор необходимо чтобы аккумулятор стартера не был разряжен, а также нужно наличие достаточного топлива в топливном баке. Это осуществляется с помощью датчиков уровня топлива и напряжения.

Алгоритм работы системы, который позволяет правильно и эффективно осуществлять выбор и переключение между режимами работы электроэнергетической системы представлен на рис. 6.

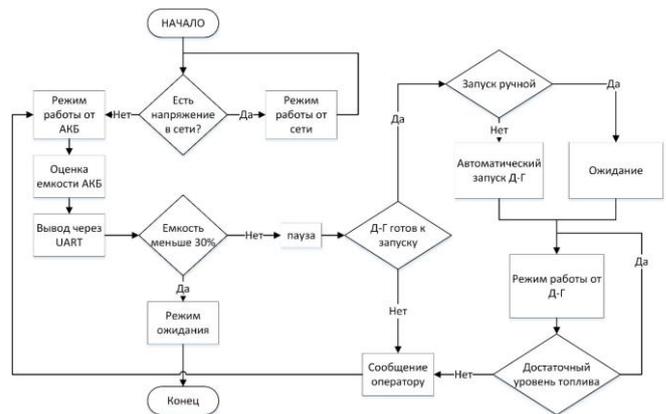


Рис. 6. Блок-схема алгоритма

В начале работы проверяется наличия напряжения на шине питания от сети, в случае наличия напряжения на шине осуществляется коммутация электромеханического реле, что обеспечит режим работы от сети; в противном случае система получает питание от аккумуляторов. Далее осуществляется оценка текущего состояния аккумуляторов и вывод полученных данных через последовательный интерфейс UART. С помощью последовательного интерфейса осуществляется вывод данных о состоянии аккумулятора в программу для визуального отображения состояния системы.

Следующий шаг – проверка состояния аккумулятора. Так как глубокий разряд аккумулятора значительно сокращает срок его службы, то целесообразно не допускать эксплуатацию аккумулятора до такого состояния. Для этого производится проверка емкости аккумулятора, если емкость аккумулятора ниже 30%, то система переходит в режим ожидания. Если емкость аккумулятора находится в допустимых пределах, то выжидается некоторое значение времени и осуществляется запрос на запуск дизель-генератора. Задержка по времени нужна для того, чтобы исключить возможность работы дизель-генератора и сети одновременно. Если дизель-генератор не готов к запуску, то об этом сообщается оператору, и система работает в режиме от аккумулятора. В противном случае имеется возможность запуска дизель-генератора в ручном режиме и в автоматическом режиме. После запуска система работает в режиме работы от дизель-генератора до тех пор, пока не закончится топливо в топливном баке или пока автономное транспортное средство не завершит выполнение своих задач.

III. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Главным недостатком имеющегося дизель-генератора является то, что при работе на малые нагрузки расходуется большое количество топлива. Кривая удельного расхода топлива для дизельного двигателя показана на рис. 7 [4].

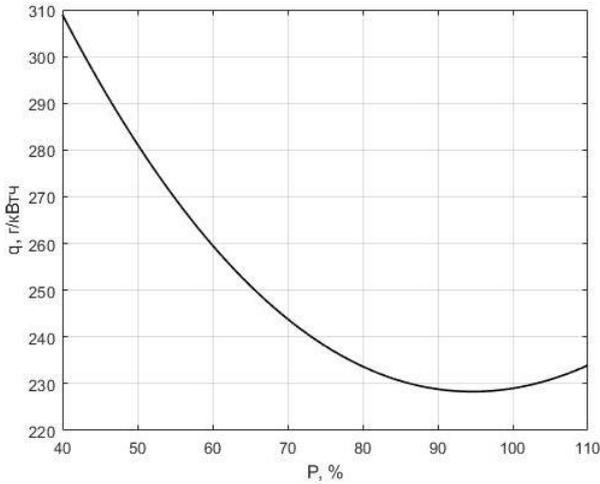


Рис. 7. Кривая удельного расхода топлива

Рис. 7 показывает, сколько граммов топлива необходимо для производства 1 кВтч энергии при различных нагрузках дизельного двигателя, которые выражаются в процентах от номинальной мощности. Видно, что самый низкий расход топлива наблюдается, когда дизельный двигатель нагружен от 80% до 90% своей номинальной мощности.

В нашем случае дизель-генератор мощностью 5кВт должен работать с нагрузкой около 2,5 кВт. Это соответствует 50% нагрузки. Для снижения расхода топлива предложена следующая схема: при малых скоростях квадроцикла электродвижение будет осуществляться при помощи электрического двигателя, работающий от аккумуляторных батарей, при больших скоростях квадроцикла привод колес будет осуществляться непосредственно двигателем внутреннего сгорания. Схема данного метода изображена на рис. 8, где обозначено: ДВС – двигатель внутреннего сгорания, СГ – синхронный генератор, BLDC – электродвигатель с постоянными магнитами, Р – редуктор, СВ – система возбуждения, К – колеса.

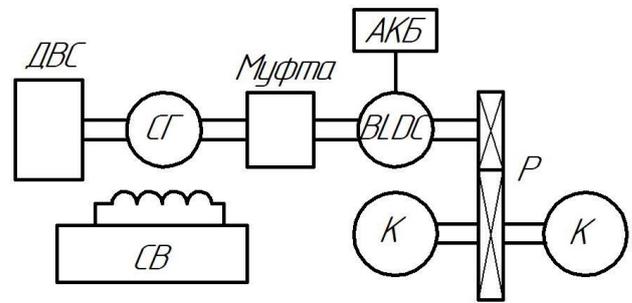


Рис. 8. Схема снижения расхода топлива

На рис. 8 предполагается, что вал общий (сквозной). В качестве муфты используется электромагнитная фрикционная муфта. Таким образом, при малых скоростях муфта разомкнута и привод квадроцикла осуществляется электрическим двигателем BLDC, работающий от АКБ; при больших скоростях муфта замыкается, а электрический двигатель BLDC отключается. Привод осуществляется непосредственно двигателем внутреннего сгорания. Благодаря такой схеме можно значительно снизить расходы топлива и тем самым улучшить показатели автономности транспортного средства.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электроэнергетическая система значительно повышает время автономной работы квадроцикла, что является важным показателем для автономных объектов. Для улучшения технических характеристик квадроцикла в дальнейшем планируется вместо электрического двигателя мощностью 1 кВт установить электрический двигатель мощностью 3 кВт. Данная модификация позволит не только улучшить технические характеристики квадроцикла, но и позволит снизить удельные расходы топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Сидоров М.В. и др. Перспективы развития автомобилей с гибридной силовой установкой // International Journal of Advanced Studies. 2020. Т. 10. №. 1. С. 67-80.
- [2] Умняшкин В.А., Филькин Н.М., Музофаров Р.С., Хамидуллин Р.П. Выбор мощности тягового электродвигателя, двигателя внутреннего сгорания и параметров накопителей гибридных силовых установок автомобилей: Учебное пособие. Ижевск: НИЦ «Регуляторная и хаотическая динамика», 2006. 138 с.
- [3] Казанчева А.Н., Горшкова О.О. Развитие аккумуляторов, созданных по технологии AGM // Прорывные научные исследования как двигатель науки. 2017. С. 146-150.
- [4] Cuculic A., Vučetić, D., Prenc, R., Čelić, J. Analysis of Energy Storage Implementation on Dynamically Positioned Vessels. Energies 2019, 12, 444. <https://doi.org/10.3390/en12030444>