

Использование динамического программирования для повышения энергоэффективности гибридных транспортных средств

Н.А. Кулаев, П.С. Зубков

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

Аннотация: Тенденция перехода автономных транспортных средств с двигателей внутреннего сгорания на электропривод приводит к необходимости поиска промежуточных решений. Гибридный транспорт на данный момент является достаточно популярным компромиссом. Повышения его энергоэффективности возможно несколькими способами. В данной статье показывается программный способ на основе динамического программирования, которое позволяет оптимизировать потребление топлива за счет разделения использования двигателя внутреннего сгорания и электропривода. Также в данной работе проведено математическое моделирование схемы движения автомобиля и определение оптимального распределения скорости и заряда батареи в зависимости от разрядности системы.

Ключевые слова: Гибридный транспорт, математическое моделирование, динамическое программирование, программируемые логические интегральные схемы, двигатель внутреннего сгорания, электропривод.

Использование топлива гибридного электромобиля может быть уменьшено путем стратегического сочетания двигателя внутреннего сгорания с электродвигателем.

Путем адаптации характера движения транспортного средства по дороге можно снизить расход топлива и вредные выбросы транспортного средства. Это относится как к обычным негибридным транспортом [1], так и к гибридным электромобилям, где энергия может храниться в аккумуляторе для дальнейшего использования. Динамическое программирование – это один из методов, который успешно используется для расчета эффективного разделения использования электродвигателя и двигателя внутреннего сгорания [2].

Гибридные автомобили (англ. Hybrid Electric Vehicle – HEV) могут быть разделены на различные категории в зависимости от конфигурации трансмиссии. В большинстве серийных моделей двигатель внутреннего

сгорания приводит в движение генератор, который подает электричество на аккумулятор и электродвигатель, фактически приводящий в движение колеса. Параллельный гибрид использует двигатель внутреннего сгорания вместе с электродвигателем для привода колес, но не использует двигатель внутреннего сгорания для подачи электроэнергии. Наконец, комбинированный гибрид использует двигатель внутреннего сгорания как для привода колес, так и для выработки электроэнергии [3].

В общем случае, гибридный автомобиль – это набор управляющих входов, который включает в себя такие переменные, как тормозное усилие, крутящий момент электродвигателя, а также крутящий момент и механизм двигателя внутреннего сгорания. Имеется также набор переменных состояния, которые включают в себя скорость, состояние заряда аккумулятора и количество топлива.

Множество состояний во времени (или расстоянии) можно рассматривать как точки в $n+1$ -мерном пространстве, где n – количество переменных состояния. На рисунке 1 показан пример с одной переменной состояния: скорость.

Динамическое программирование решает задачи рекурсивной оптимизации, когда подзадачи пересчитываются несколько раз. Это делается путем вычисления и сохранения решения для каждой подзадачи один раз и повторного использования этого решения в следующий раз, когда вычисляется та же самая подзадача [4]. В этом случае задача оптимизации, которая должна быть решена, заключается в нахождении схемы движения, которая максимально эффективно переводит транспортное средство из исходного состояния в конечное.

Чтобы решить эту проблему, ценность каждой точки в пространстве состояний определяется как наиболее эффективный путь от этой точки до

пункта назначения. Обозначается через $v[d;x]$ где d – расстояние, а x – вектор переменных состояния.

Наиболее эффективный путь может быть рассчитан, как:

$$v[d;x] = \min_i \sum_{states(d)} v(d + \Delta d, i) + travelCost((d,x),i))$$

где функция $travelCost$ обозначает ценность перехода из одного состояния в другое, а $states$ – это набор возможных значений переменных состояния в момент времени d .

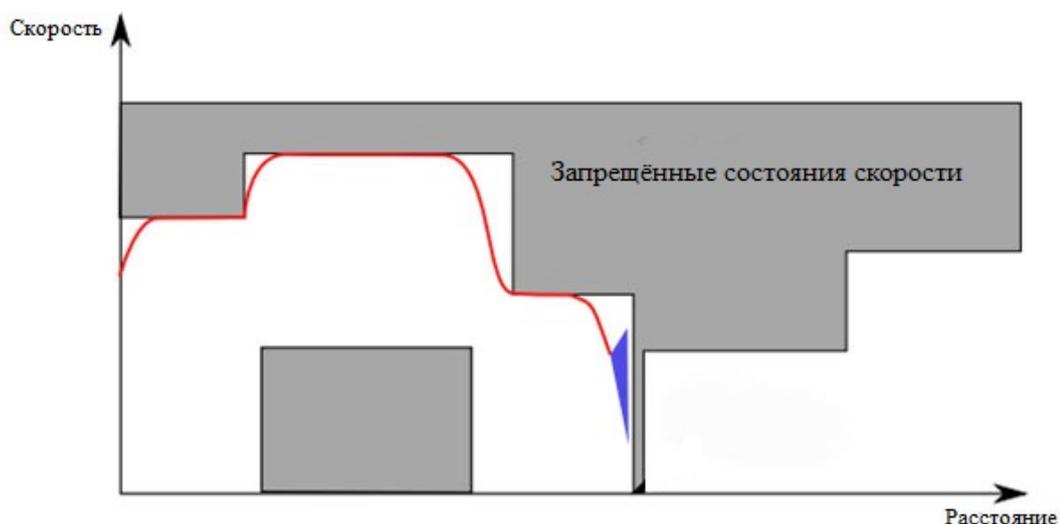


Рисунок 1 – Пример пространства состояний для транспортного средства с единственной переменной состояния: скорость. Серые области являются запрещенными состояниями, красный путь – это траектория выборки, а синий треугольник указывает достижимые состояния за один временной шаг.

Кроме того, какие состояния на следующем шаге по времени могут быть достигнуты из одного состояния неизвестно и должно быть рассчитано на основе модели трансмиссии.

Для определения влияния количества дробных битов на качество выходных характеристик, было проведено математическое моделирование

типовой схемы движения транспортного средства по дороге общего пользования.

На рисунках 2 и 3 показано оптимальное распределение скорости и уровень заряда в каждом состоянии, рассчитанные моделью при работе на разных длинах слов.

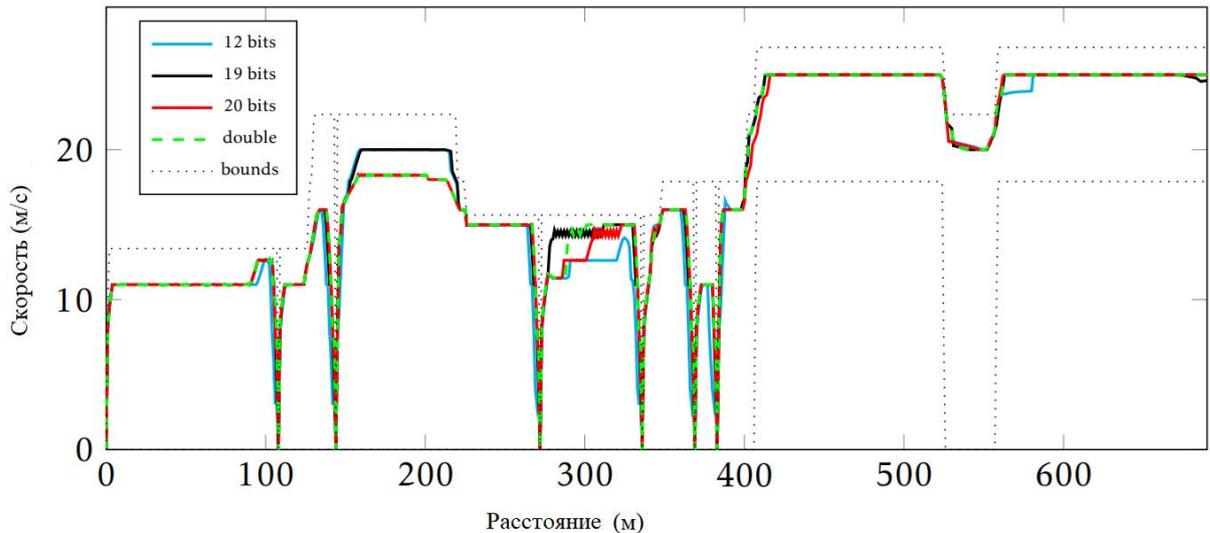


Рисунок 2 – Оптимальное распределение скорости в зависимости от длины слова

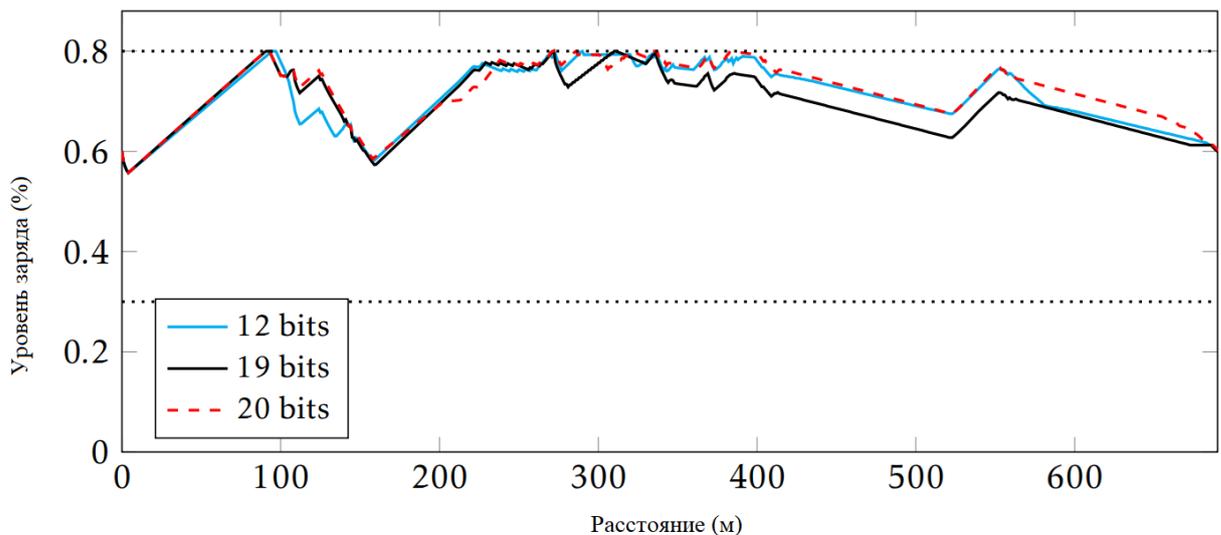


Рисунок 3 – Оптимальное распределение заряда батареи в зависимости от длины слова

Как и следовало ожидать, графики показывают, что схемы движения отличаются от исходной модели при 12 битах больше, чем при 20 битах.

На рисунке 4 показана оптимальная скорость, рассчитанная для 20, 25 и 31 бит. Он показывает, что кривая скорости идентична исходной при 31 бите, и что нет разницы между результатами при работе с 20 или 25 битами.

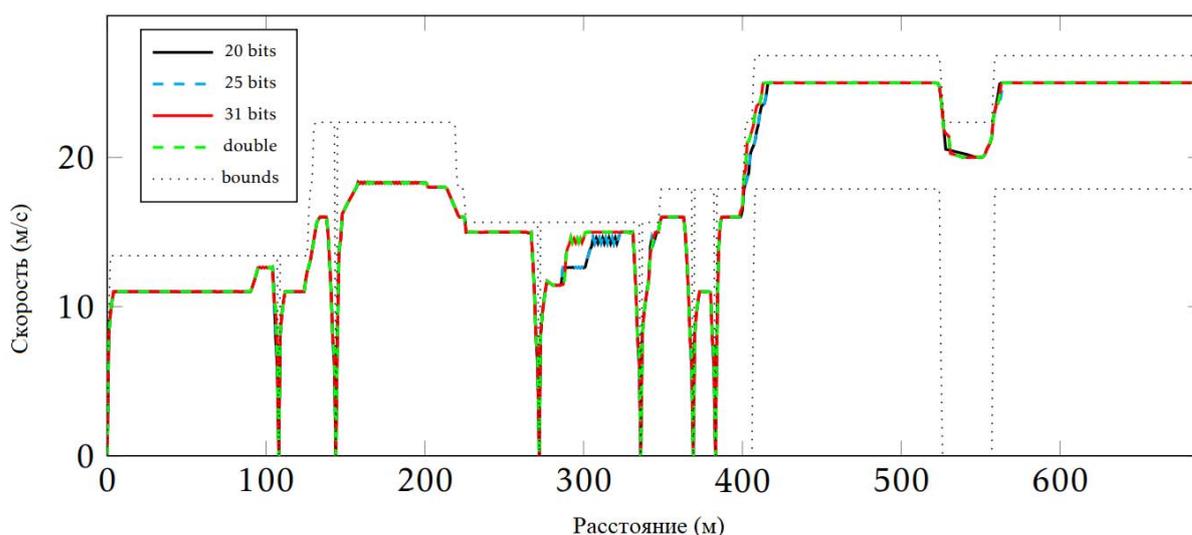


Рисунок 4 – Оптимальная скорость при большем числе дробных битов

Развитие динамического программирования с точки зрения аппаратной реализации возможно с помощью программируемых логических интегральных схем. Чтобы алгоритмы эффективно выполнились на программируемых логических интегральных схемах (Далее ПЛИС), требуется некоторая степень параллелизма. К счастью, транспортное средство как система может двигаться только во времени и не может перемещаться между состояниями за один временной шаг. Следовательно, ценность каждого состояния за один временной шаг может быть рассчитана параллельно. Также предлагаются некоторые возможные изменения модели и задачи оптимизации, которые сделали бы ее более пригодной для использования на ПЛИС. Большинство предложенных изменений

уменьшают использование аппаратного обеспечения, избегая ненужных сложных вычислений, например, заменяя деление на умножение и изменяя представление одного из состояний от квадрата скорости к линейному.

Литература

1. Hellström E., M. Ivarsson, J. Åslund and L. Nielsen, 2009. Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption. *Control Engineering Practice*, 17(2): pp. 245-254.
2. Laura V. Pérez, Guillermo R. Bossio, Diego Moitre and Guillermo O. García, 2006. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming. *Mathematics and Computers in Simulation*, 73(1): pp. 244– 254.
3. Sciarretta A. and Guzzella L., 2007. Control of hybrid electric vehicles. *IEEE Control Systems Magazine*, 27(2): pp. 60–70.
4. Thomas H. Cormen, 2001. *Introduction to algorithms*. Cambridge, Mass. : MIT Press, cop., p.984.
5. Швердяков Я.А., Кармайкин Д.Ю. Энергоэффективность гибридных автомобилей // *Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи*. Томск: ООО «ЦРУ», 2016. С. 248-249.
6. Боргоякова Т.Г., Лозицкая Е.В. Системный анализ и математическое моделирование // *Инженерный вестник Дона*. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4763
7. Юренко К.И. Расчет энергооптимальных режимов подвижного состава методом динамического программирования // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2013. №3. С.78-82.
8. Кулаев Н.А., Зубков П.С. Математическое описание управления синхронным двигателем с постоянными магнитами для аппаратной реализации на ПЛИС // *Инженерный вестник Дона*. 2019. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6039

9. Вычужанин В.А. Методика проектирования оптимальных систем управления электродвигателями на ПЛИС // Современная электроника. 2011. № 7. С. 54-59

10. Куликов И. Динамическое программирование как инструмент теоретического исследования силовой установки гибридного автомобиля // Журнал автомобильных инженеров. 2010. №4(63). С. 36-39.

References

1. Hellström E., M. Ivarsson, J. Åslund and L. Nielsen. Control Engineering Practice. 2009. №17 (2). pp. 245-254.

2. Laura V. Pérez, Guillermo R. Bossio, Diego Moitre and Guillermo O. García. Mathematics and Computers in Simulation. 2006. №73 (1). pp. 244-254.

3. Sciarretta A. and Guzzella L. IEEE Control Systems Magazine. 2007. №27 (2). pp. 60-70.

4. Thomas H. Cormen. Introduction to algorithms. MIT Press. Cambridge. 2001. 984 p.

5. Shverdyakov Y.A., Karmaykin D.Y. Energetika, elektromekhanika i energoэффективnyye tekhnologii glazami molodezhi. Tomsk. 2016. pp. 248-249.

6. Borgoyakova T.G., Lozitskaya E.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4763

7. Yurenko K.I. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. 2013. №3. pp. 78-82.

8. Kulayev N.A., Zubkov P.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6039

9. Vychuzhanin V.A. Sovremennaya elektronika. 2011. № 7. pp. 54-59.

10. Kulikov I. Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov. 2010. №4(63). pp. 36-39.