

УДК 629.33.03-83-592.2

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ НА СКЛОНЕ

USING THE REGENERATED HYDRAULIC BRAKING SYSTEM ON A SLOPE

**Сокол В. А.**, ст. преп., **Маковская И. А.**, ст. преп.,  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь,  
V. Sokol, Senior Lecturer, I. Makouskaya, Senior Lecturer,  
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus,

*В статье приводится математическая модель эксплуатации гидравлической тормозной системы электромобиля с рекуперацией на склоне, учитывающая динамику движения и рабочие процессы.*

*The article presents a mathematical model for the operation of the hydraulic braking system of an electric vehicle with recuperation on a slope, taking into account the dynamics of movement and work processes.*

**Ключевые слова:** гидравлические системы в электромобиле, процесс рекуперации в электромобиле, математическая модель тормозной системы с рекуперацией на склоне.

**Keywords:** hydraulic systems in an electric vehicle, recuperation process in an electric vehicle, mathematical model of a braking system with regeneration on a slope.

### ВВЕДЕНИЕ

Гидравлические системы нашли широкое применение в различных областях промышленности, включая автомобильную. Одним из примеров является использование гидравлики в электромобилях. Гидравлические системы могут использоваться для различных функций, таких как управление тормозами, подъемом и опусканием кузова; регулировка подвески.

Одними из основных преимуществ использования гидравлики в электромобилях являются высокий КПД и быстродействие. Также гидравлические системы обладают высокой надежностью и долго-

вечностью, что позволяет использовать их в тяжелых условиях эксплуатации.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Тормозная система с рекуперацией позволяет эффективно использовать кинетическую энергию, выделяемую при торможении, для зарядки аккумуляторной батареи, что приводит к увеличению дальности перемещения и уменьшению износа тормозной системы.

В электромобилях с рекуперацией гидравлический усилитель тормозов интегрирован в систему управления. При торможении система использует электромоторы для преобразования кинетической энергии автомобиля в электрическую, которая впоследствии сохраняется в аккумуляторной батарее. Если энергии, полученной в результате рекуперации, недостаточно для полной остановки автомобиля, гидравлический тормозной усилитель осуществляет дополнительное торможение.

Эксплуатация такой системы может иметь свои особенности. При движении вниз по склону автомобиль приобретает большую кинетическую энергию, и использование только гидравлической тормозной системы может привести к ее быстрому износу. В таких ситуациях рекомендуется использовать эффективную схему совместной работы гидравлической тормозной и рекуперативной систем, которая позволяет восстановить энергию торможения и направить ее на заряд батареи.

Недостатком эксплуатации гидравлической тормозной системы электромобиля является необходимость поддержания высокого уровня заряда батареи для обеспечения возможности использования рекуперации на склонах. Если заряд батареи низкий, рекуперация может быть невозможна, и торможение будет осуществляться только гидравлической тормозной системой.

Особенность эксплуатации гидравлической тормозной системы электромобиля с рекуперацией на подъеме заключается в том, что при движении в гору скорость машины может уменьшаться и требуется более интенсивное торможение. В этом случае важно правильно выбрать, когда необходимо применить гидравлическую тормозную систему, а когда должна работать рекуперация. При использовании автомобиля на подъем необходимо учитывать, что передние тормоза будут более активны, что может привести к их

быстрому износу и, следовательно, к необходимости чаще менять передние тормозные колодки по сравнению с задними.

Для предотвращения перегрева рекомендуется использовать автоматическое управление торможением, которое позволяет эффективно использовать энергию рекуперации и снижать нагрузку на гидравлическую тормозную систему. Также необходимо регулярно проверять состояние тормозных механизмов и вовремя производить замену изношенных деталей.

Методы автоматического управления тормозной системой электромобиля с рекуперацией могут быть разделены на несколько способов:

1. Предиктивное управление использует данные о дороге, топографии местности и состоянии автомобиля для прогнозирования безопасности и определения наилучшей стратегии торможения.

2. Управление с использованием соответствующих алгоритмов использует данные об условиях на дороге и состоянии автомобиля для настройки параметров тормозной системы, таких как коэффициент и усиление торможения. Эти параметры можно изменять в текущий момент, чтобы обеспечить оптимальную эффективность торможения.

3. Гибридное управление объединяет несколько способов управления, чтобы обеспечить оптимальную эффективность торможения в различных условиях. Например, можно использовать предиктивное управление для определения наилучшего торможения на основе прогнозируемых условий на дороге, а затем использовать управление на основе правил для корректировки в зависимости от текущего состояния автомобиля.

Математическая модель эксплуатации гидравлической тормозной системы электромобиля с рекуперацией на склоне учитывает динамику движения и рабочие процессы:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F_{\tau} - F_{\text{ск}} - F_a - F_{\text{ac}},$$

$$F_{\tau} = \frac{N}{r},$$

$$F_{\text{ск}} = m \cdot g \cdot \sin\theta,$$

$$F_{\text{св}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{\text{ф}} \cdot C_{\text{с}} \cdot v^2,$$

$$F_{\text{ac}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{\text{б}} \cdot C_{\text{с}} \cdot v^2,$$

$$\frac{dE_{\text{б}}}{dt} = N_{\text{б}} - N_{\text{в}} - N_{\text{всп у}},$$

$$N_{\text{всп у}} = I \cdot U_{\text{всп с}},$$

где  $m$  – масса электромобиля;  $v$  – скорость движения;  $F_{\text{т}}$  – сила тяги;  $N$  – крутящий момент;  $r$  – радиус колеса;  $F_{\text{ск}}$  – сила сопротивления качению;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\theta$  – угол наклона склона;  $F_{\text{св}}$  – сила сопротивления воздуха;  $\rho$  – плотность воздуха;  $A_{\text{ф}}$  – площадь фронтальной проекции автомобиля;  $C_{\text{с}}$  – коэффициент лобового сопротивления;  $F_{\text{тг}}$  – тяговая сила;  $\alpha$  – угол между тяговой силой и вертикалью;  $F_{\text{ac}}$  – сила аэродинамического сопротивления;  $A_{\text{б}}$  – площадь боковой проекции автомобиля;  $\frac{dE_{\text{б}}}{dt}$  – скорость изменения заряда батареи;  $N_{\text{б}}$  – мощность, потребляемая от батареи;  $I$  – ток;  $U$  – напряжение;  $N_{\text{в}}$  – мощность, возвращаемая рекуперативным торможением;  $N_{\text{всп у}}$  – мощность, которую потребляют вспомогательные устройства;  $U_{\text{всп с}}$  – напряжение, которое потребляют вспомогательные системы.

Эта модель может использоваться для анализа процессов торможения и разгона электромобиля с гидравлической тормозной системой с рекуперацией на склоне. В модели учитываются факторы: масса электромобиля, угол наклона, коэффициент соотношения между колесами и дорогой, параметры гидравлической системы торможения, эффективность рекуперации энергии.

Применение гидравлической тормозной системы электромобиля с рекуперацией на склоне позволяет эффективнее использовать энергию при движении, а также повысить безопасность и срок службы электромобиля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование гидравлической системы торможения с рекуперацией имеет свои преимущества и недостатки, и может быть эффективным в определенных условиях, таких как движения на склонах с небольшим наклоном, перемещение городской среде или при движении с низкой скоростью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, А. В. Исследование гидравлической тормозной системы электромобиля / А. В. Петров // Наука и молодежь. – 2017. – С. 139–143.
2. Математическое моделирование и исследование параметров гидравлической тормозной системы электромобиля / Д. И. Чупин [и др.] // Сибирский журнал науки и технологий, том 20, вып. 2. – 2019.
3. Gharakhani / Simulation and experimental verification of a hydraulic brake system in an electric vehicle / Gharakhani, M. Rezvani, S. A. Nabavi // International Journal of Automotive Technology, vol. 18, no. 1. – 2017. – Pp. 107–114,

Представлено 12.05.2023