

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.3

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-2-6

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ***д-р техн. наук, доц. С.А. РЫНКЕВИЧ**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;
Белорусско-Российский университет, Могилев)*

Отмечается, что в электрических транспортных средствах, т.е. электромобилях, повышенные нагрузки чаще всего возникают на узлах, которые либо работают в режимах высокого тягового усилия/торможения, либо несут ударные и тепловые воздействия, например, рекуперация. Одним из высоконагруженных элементов электрического транспортного средства (ЭТС) является его тормозная система. Это особенно характерно для режима комбинированного торможения, включающего рекуперативное и механическое торможение. Рассмотрены причины, по которым тормозная система электромобиля требует повышенного внимания. Среди них важнейшими являются интенсивные режимы эксплуатации, высокая цикличность, гибридный характер торможения, включающий рекуперативное торможение и механическое торможение, электромеханические риски, вопросы отказоустойчивости, процессы изнашивания элементов тормозов. Выделено и подробно описано шесть особенностей процессов торможения электрических транспортных средств. Рассмотрены особенности расчета тормозной системы ЭТС и ее основных элементов, приведен ряд расчетных формул для определения энергетических, тепловых и других характеристик тормозов. Приведен алгоритм, который может быть реализован средствами бортовой микроэлектроники электрического транспортного средства. Отмечено, что бортовым компьютером осуществляется проверка основных параметров. В случае если контролируемые параметры находятся в пределах допускаемых значений, на дисплее водителя выдается сообщение о работоспособности ЭТС. В противном случае требуются контрольно-диагностические работы.

Ключевые слова: *электрическое транспортное средство, тормозная система, рекуперативное торможение, фрикционное торможение, тормозной момент.*

Введение. В электрических транспортных средствах (ЭТС), т.е. электромобилях, повышенные нагрузки чаще всего возникают на узлах, которые либо работают в режимах высокого тягового усилия/торможения, либо несут ударные и тепловые воздействия (рекуперация, просадки напряжения, вибрации, частые циклы). Одним из высоконагруженных элементов ЭТС является тормозная система (особенно диски и механизмы при частичном «смешанном» торможении). Хотя рекуперативное торможение и берет на себя часть энергии, в реальных условиях эксплуатации часто используется комбинированное торможение, особенно при полной остановке и экстренном торможении. В этих ситуациях механические тормоза испытывают большие нагрузки.

Основная часть. Особое внимание к тормозной системе электромобилей обусловлено несколькими ключевыми факторами. Во-первых, это интенсивные режимы эксплуатации и высокая цикличность. В городских условиях ЭТС часто совершает маневры торможения и ускорения, что приводит к многократному использованию механических элементов тормозов (дисков, колодок, суппортов). Важно отметить, что даже при активной рекуперации, фрикционные тормоза все равно задействуются при резком замедлении, на малых скоростях или на скользкой дороге, когда эффективность рекуперации снижается. Во-вторых, это гибридный характер торможения. Рекуперация существенно влияет на работу всей тормозной системы. Специальный алгоритм управления динамически распределяет тормозной момент между электродвигателем, осуществляющим рекуперацию, и традиционными фрикционными тормозами. В то же время комбинированное торможение усложняет контроль температурных режимов и процессов изнашивания. В-третьих, основные трудности связаны с температурными режимами и возникающими из-за них нагрузками. При резком торможении электромобиля, особенно когда рекуперация ограничена (например, из-за старой или холодной батареи), фрикционные тормоза работают интенсивнее. Это может вызвать перегрев тормозных дисков, неравномерный износ, вибрацию при торможении и повышенные термические напряжения. Ограничения рекуперации, в свою очередь, зависят от множества факторов, таких как температура батареи, скорость, сцепление шин с дорогой и допустимая мощность зарядки. В такие моменты основная нагрузка ложится на тормозные колодки и диски, поэтому их способность выдерживать пиковые нагрузки критически важна. В-четвертых, необходимо учитывать электромеханические риски и вопросы отказоустойчивости. Высокая степень интеграции электроники в электромобилях (системы контроля устойчивости, распределения тормозных усилий, взаимодействия с ЭБУ) требует надежных алгоритмов. При возникновении неисправностей система должна корректно переходить в безопасный режим, например, обеспечивая необходимое тормозное уси-

лие только за счет фрикционных тормозов. В-пятых, обеспечение безопасности при экстренном торможении является первостепенной задачей. Требования к эффективности и стабильности торможения одинаково важны для всех транспортных средств. Однако для электромобилей особенно важно гарантировать работоспособность тормозной системы в моменты, когда рекуперация может быть ограничена. Фрикционные тормоза должны гарантировать предсказуемое замедление и сохранение устойчивости движения. В-шестых, это подверженность ресурса деградации вследствие износа. Неоптимальное соотношение между процессами рекуперации энергии и фрикционным торможением способно интенсифицировать износ тормозных колодок (и дисков), приводить к недостаточному прогреву рабочих поверхностей и, как следствие, снижать эффективность торможения. В связи с этим мониторинг ключевых параметров состояния (температурный режим, степень износа, функциональность суппортов, состояние рабочей жидкости и датчиков) приобретает важнейшее значение.

Рассмотрим особенности расчета тормозной системы ЭТС и ее основных элементов.

Энергия, которую тормозная система электромобиля должна поглотить на определенном отрезке пути, эквивалентна его кинетической энергии. Кинетическая энергия ЭТС, которую должны «забрать» тормоза на заданном интервале, равна

$$W_T = \frac{m_{\text{эТС}} \cdot (v_0^2 - v_k^2)}{2},$$

где $m_{\text{эТС}}$ – масса ЭТС, кг; v_0 и v_k – начальная и конечная скорости торможения, м/с. В случае полной остановки электромобиля $v_k = 0$.

Если учитывать комбинированное торможение (рекуперативное и фрикционное), энергия которого равна $W_{\text{фТ}}$, то вводят долю энергии, уходящую во фрикционные тормоза:

$$W_{\text{фТ}} = (1 - \eta_{\text{рек}}) \cdot W_T,$$

где $\eta_{\text{рек}}$ – доля энергии, утилизируемая рекуперацией. $\eta_{\text{рек}}$ принимает значения в диапазоне [0, 1].

Для электробусов значения $\eta_{\text{рек}}$ обычно принимают от 0,2 до 0,4, для легковых электромобилей – от 0,25 до 0,45 (т.е. уходящая во фрикционные тормоза доля энергии составляет 20–40% для электробусов и 25–45% для легковых электромобилей).

Важно принимать во внимание, что при достижении уровня заряда батареи в диапазоне 95–100% происходит автоматическое отключение или существенное ограничение функции рекуперативного торможения. Данная мера предосторожности направлена на предотвращение перезаряда аккумуляторных ячеек. Следовательно, в таких условиях кинетическая энергия, обычно преобразуемая в электрическую, рассеивается в виде тепловой энергии на тормозных дисках.

Тормозной момент M_T (Н·м) на колесе можно определить по формуле

$$M_T = \frac{F \cdot R_d}{z \cdot n},$$

где F – суммарная тормозная сила, Н; R_d – внешний (средний) радиус диска (для расчетов берут эффективный радиус, или радиус контакта колодок), м; z – число колес, участвующих в торможении; n – число тормозных механизмов колодка-диск на одно колесо (часто $n = 1$).

Момент M_T , который может развивать тормозной механизм, пропорционален усилию нажатия на педаль тормоза $F_{\text{пед}}$: $M_T = k_{\text{тп}} F_{\text{пед}}$. Коэффициенты пропорциональности $k_{\text{тп}}$ для тормозных механизмов передних и задних колес обычно различны, поэтому отличаются и развиваемые ими моменты.

Для определения тормозной силы F можно воспользоваться выражением

$$F = m_{\text{эТС}} \cdot a_T,$$

где a_T – значение среднего замедления, м/с².

Для электробуса значения среднего замедления a_T составляют 1,0–1,5 м/с², что соответствует комфортному городскому движению. Для более жесткого торможения (например, приближение к остановке «по требованию») значение a_T можно принимать до 2,0 м/с².

Для легкового электромобиля значения среднего замедления a_T составляют 1,2–1,8 м/с² (комфортный режим) и до 2,5 м/с² для экстренного торможения.

Тормозная сила, действующая на колесо:

$$F_k = \frac{F}{z}.$$

Рассмотрим особенности механики прижимания тормозных колодок в ЭТС. Сила трения $F_{\text{тр}}$ на колесе определяется по выражению

$$F_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} \cdot N,$$

где N – суммарная нормальная сила прижимания (на комплект колодок одного колеса), Н; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения колодка–диск при данных условиях. Он зависит от типа накладок и режима (температура, влажность, наличие грязи, скорость скольжения).

Для сухого и прогретого диска фрикционных тормозов $k_{\text{тр}} = 0,35–0,45$. В случае холодных тормозов (первое торможение) $k_{\text{тр}} = 0,20–0,35$. В случае мокрого диска (дождь, вода на поверхности) $k_{\text{тр}} = 0,15–0,25$. При наличии грязи и пыли на диске (частично нарушен контакт) $k_{\text{тр}} = 0,20–0,30$. В случае перегрева фрикционных элементов тормозов значение коэффициента трения можно принимать из интервала $0,30–0,40$.

Следует отметить, что для оценки требуемого тормозного момента целесообразно использовать худшие условия эксплуатации тормозов (влага, непрогретость).

Среднее давление p в зоне контакта рассчитывается как

$$p = \frac{N}{A},$$

где A – площадь контакта.

Площадь контакта A можно приблизительно определить по формуле

$$A \approx b \cdot l$$

где b – ширина колодки; l – длина рабочей зоны по радиусу.

Обычно для тормозных колодок проверяют: прочность материала колодки на сжатие/сдвиг, прочность крепления накладки, износ по линейной модели. В учебных или проектных расчетах распространена модель износа по работе трения, а напряжения оценивают через p и допускаемые значения.

Важно подчеркнуть, что в реальных условиях эксплуатации тормозная колодка ЭТС подвергается воздействию следующих факторов: значительных контактных напряжений, неравномерного распределения давления при контакте, локальных участков с повышенной температурой, а также градиентов физико-механических свойств, обусловленных наличием текстуры и пористости материала.

При анализе тепловой нагрузки диска, ключевыми аспектами являются температурные поля и возникающие в результате термонапряжения. При этом средняя энергия, диссипирующая в процессе торможения в зоне фрикционного контакта, будет равна $W_{\text{фТ}}$.

Доля энергии W_d , уходящая в диск (а не в колодку):

$$W_d = k \cdot W_{\text{фТ}},$$

где k – доля тепла, попадающая в диск (остальное в колодки/потери), обычно принимают k от 0,2 до 0,7, что зависит от материалов и конструкции.

Энергия, приходящаяся на один диск (одно колесо), равна

$$W_{d1} = \frac{W_d}{z}$$

Для упрощенного определения увеличения средней температуры диска можно пренебречь факторами теплоотдачи в процессе торможения и неоднородностью температурного распределения по его толщине. Тогда увеличение средней температуры диска можно определить как

$$\Delta T_d = \frac{W_{d1}}{m_d c_d},$$

где m_d – масса одного диска, кг; c_d – теплоемкость материала диска (колодки), Дж/(кг·К).

Среднюю тепловую мощность можно оценить по следующим формулам:

$$P_{\text{фТ}} = \frac{W_{\text{фТ}}}{t},$$

$$P_{d1} = \frac{k \cdot W_{\text{фТ}}}{z \cdot t},$$

где t – время торможения.

Средняя тепловая мощность, выделяющаяся при торможении электромобиля, зависит от баланса между кинетической энергией, которую нужно погасить, и тем, какая часть этой энергии превращается в тепло, а какая – возвращается в батарею.

Напряжения (в Па) от температурного градиента можно определить упрощенно:

$$\sigma_T \approx 1,2 \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta T ,$$

где α – коэффициент теплового расширения, $1/^\circ\text{C}$; E – модуль упругости, Па; ΔT – разность температур между «горячей» и «холодной» сторонами тормозного диска.

На рисунке приведен алгоритм, который может быть реализован средствами бортовой микроэлектроники ЭТС. Бортовым компьютером осуществляется проверка основных параметров. Если контролируемые параметры находятся в пределах допустимых значений, то на дисплее водителя выдается сообщение о работоспособности ЭТС. В противном случае требуются контрольно-диагностические работы.

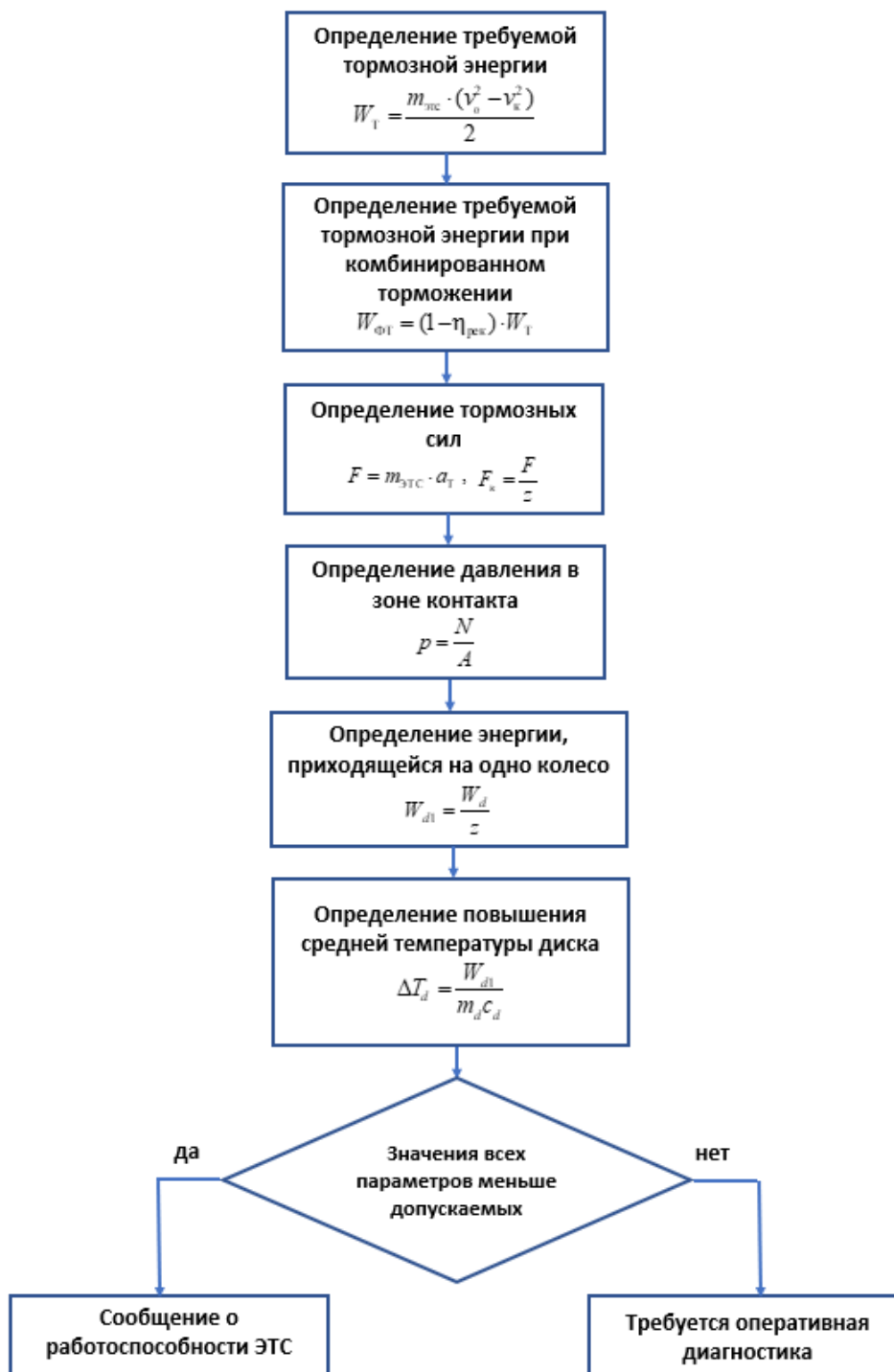


Рисунок. – Алгоритм работы системы торможения в электромобиле

Заключение. При анализе тормозной системы ЭТС следует учитывать ряд факторов, важнейшими из которых являются интенсивные режимы эксплуатации, высокая цикличность, гибридный характер торможения, включающий рекуперативное торможение и механическое торможение, погодные и климатические условия, электромеханические риски, вопросы отказоустойчивости, характер изнашивания элементов тормозов. В случае ограниченных возможностей рекуперативного торможения фрикционные тормоза должны гарантировать предсказуемое замедление и сохранение устойчивости движения. Для оценки работоспособности тормозной системы могут составляться специальные алгоритмы, который могут быть реализованы средствами бортовой микроэлектроники ЭТС.

Поступила 30.03.2026

CALCULATION FEATURES OF ELECTRIC VEHICLE BRAKING SYSTEM ELEMENTS DURING BRAKING

S. RYNKEVICH

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;
Belarusian-Russian University, Mogilev)*

It is noted that in electric vehicles, i.e., electric cars, increased loads most often occur on components that either operate in high traction/braking modes or bear impact and thermal effects, such as recuperation. One of the highly loaded components of an electric vehicle (EV) is its braking system. This is especially characteristic of the combined braking mode, which includes regenerative and mechanical braking. The reasons why the braking system of an electric vehicle requires increased attention are considered. Among the most important of these are intensive operating modes, high cyclicality, the hybrid nature of braking (including regenerative braking and mechanical braking), electromechanical risks, fault tolerance issues, and wear processes of brake components. Six features of the braking processes of electric vehicles are identified and described in detail. The article examines the calculation features of an electric vehicle's braking system and its main components, presenting a number of calculation formulas for determining the energy, thermal, and other brake characteristics. An algorithm that can be implemented using the electric vehicle's onboard microelectronics is presented. It is noted that the onboard computer checks the main parameters. If the monitored parameters are within acceptable limits, a message is displayed on the driver's display confirming the vehicle's operability. Otherwise, further testing and diagnostic work is required.

Keywords: *electric vehicle, braking system, regenerative braking, friction braking, braking torque.*