

УДК 629.113/115

К ВОПРОСУ О ДИНАМИЧЕСКОМ ТОРМОЖЕНИИ

А.А. Шорин, к.т.н. / К.Е. Карпухин, к.т.н. / Е.В. Зиновьев / С.Ф. Складчинский
ФГУП «НАМИ»

В настоящее время наблюдается тенденция к росту производства электромобилей и автомобилей с комбинированной энергетической установкой (КЭУ). По итогам 2011 года в мире было продано около 60 тысяч электромобилей, в дальнейшем ожидается существенный рост продаж. На начало 2013 года в мире реализовано свыше пяти миллионов автомобилей с комбинированными энергоустановками, и объёмы их производства постоянно растут. К 2015 году объём производства электромобилей во всём мире должен значительно увеличиться, а суммарная мощность аккумуляторных батарей — достичь 17,331 МВт·ч. При этом в современных электромобилях и автомобилях с КЭУ используется система рекуперативного торможения. В её основу положен электрический способ рекуперации кинетической энергии.

При торможении с использованием традиционной тормозной системы избыток кинетической энергии преобразуется в тепловую энергию трения тормозных колодок и тормозного диска и, соответственно, расходуется вхолостую.

В системе рекуперативного торможения для замедления используется электродвигатель, включённый в трансмиссию автомобиля. Автомобили с тяговым электроприводом имеют ряд очевидных преимуществ в сравнении с машинами, реализующими только тягу от ДВС. Одним из таких преимуществ принято считать возможность рекуперативного торможения, при котором электродвигатель начинает работать в генераторном режиме, на валу двигателя создаётся тормозной момент и вырабатывается электрическая энергия, сохраняющаяся в аккумуляторной батарее. Запасённая электрическая энергия используется в дальнейшем для движения автомобиля. Но насколько эффективно рекуперативное торможение, какая часть динамической энергии идёт на заряд аккумуляторной батареи? Этот очень важный вопрос стоит перед конструкторами и инженерами всего мира.

Для ответа на него необходимо рассматривать динамические затраты энергии, а также затраты энергии на преодоление аэродинамического сопротивле-

ния и сил сопротивления качению. При расчётах все экстраполяции и допущения осуществляются в пользу эффективности рекуперативного торможения.

За основу расчётов принимается полноприводный автомобиль, тяговое усилие в котором реализуется индивидуальным электроприводом каждого колеса, например мотор-колесом. При этом принимаем, что электродвигатель мотор-колеса не имеет ограничения по мощности и при любых амплитудах потребляемых токов и температурах не изменяет своих параметров, то есть параметры его энергетических потерь постоянны. Подобное допущение относится также к преобразователям, зарядному устройству и аккумуляторной батарее. Структурная схема одной координаты тягового электропривода представлена на рис. 1.

Принимаем коэффициент полезного действия (КПД) аккумуляторной батареи и зарядного устройства, а также преобразователя и электродвигателя равными 0,93.

Для расчёта рекуперации энергии при торможении требуются следующие данные:

1. Масса снаряжённого автомобиля m [кг];
2. Момент сопротивления электрической машины $T_э$ [Н·м];
3. Момент сопротивления ДВС $T_д$ [Н·м];

4. База автомобиля l [м];
5. Положение центра масс автомобиля (по базе и по высоте) [м];
6. Коэффициент лобового сопротивления C_x ;
7. Площадь поперечного сечения автомобиля A [м²];
8. Моменты инерции колёс I_k [кг · м²];
9. Момент инерции двигателя I_d [кг · м²];
10. Типоразмер шин автомобиля;
11. Передаточные числа трансмиссии.

Определение суммарного потребного тормозного момента

Для определения суммарного потребного тормозного момента необходимо составить баланс сил при торможении и вывести выражение для определения замедления:

$$a = g \left[\frac{T_{\Sigma}}{r_{k0} \cdot G_a \cdot \delta} + \frac{T_d \cdot i_{mp}}{r_{k0} \cdot G_a \cdot \delta} + \frac{G_a \cdot \psi}{G_a \cdot \delta} + \frac{0,5 \cdot C_x \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^2}{G_a \cdot \delta} \right].$$

Преобразовав получившееся выражение, получаем:

$$T_{\Sigma} = \frac{a \cdot r_{k0} \cdot G_a \cdot \delta}{g} - T_d \cdot i_{mp} - G_a \cdot \psi \cdot r_{k0} - 0,5 \cdot C_x \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^2 \cdot r_{k0},$$

где T_{Σ} — суммарный потребный тормозной момент; a — заданное замедление; G_a — вес автомобиля; g — ускорение свободного падения; r_{k0} — динамический радиус колеса в ведомом режиме; ρ_a — плотность воздуха; i_{mp} — передаточное число трансмиссии; V — скорость автомобиля. Коэффициент сопротивления качению ψ находится по формуле:

$$\psi = f_0 \cdot (1 + 6 \cdot 10^{-4}),$$

где f_0 — коэффициент сопротивления качению при малых скоростях.

Коэффициент δ учёта инерции вращающихся масс определяется по выражению

$$\delta = 1 + \frac{I_d \cdot i_{mp}^2 \cdot g}{G_a \cdot r_k \cdot r_{k0}} + \frac{\sum_1^n I_k \cdot g}{G_a \cdot r_k \cdot r_{k0}},$$

где r_k — кинематический радиус колеса.

НАХОЖДЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ

В зависимости от величины замедления нормальные реакции перераспределяются. Найдём их величины через уравнения моментов:

$$\sum M_{O2} = R_{z1} \cdot l - G_a \cdot l_2 - F_H \cdot h_g + F_W \cdot h_W + M_{f1} + M_{f2};$$

$$\sum M_{O1} = R_{z2} \cdot l - G_a \cdot l_1 - (M_{f1} + M_{f2}) - F_W \cdot h_W + F_H \cdot h_g,$$

где R_{z1} и R_{z2} — нормальные реакции; l_1 и l_2 — расстояние от центра масс до соответствующих осей; $M_{f1} + M_{f2} = (G_a f r_{\delta}) / l$ — моменты сопротивления качению; r_{δ} — динамический радиус колеса; F_W — сила сопротивления воздуха; f_H — сила инерции автомобиля; h_g — высота центра масс; h_W — высота центра поперечного сечения. Из уравнений моментов выражаем R_{z1} и R_{z2} :

$$R_{z1} = \frac{G_a \cdot a \cdot h_g}{g \cdot l} + \frac{G_a \cdot l_2}{l} - \frac{0,5 \cdot C_x \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^2 \cdot h_W}{l} - \frac{G_a \cdot f \cdot r_{\delta}}{l};$$

$$R_{z2} = \frac{G_a \cdot l_1}{l} + \frac{G_a \cdot f \cdot r_{\delta}}{l} + \frac{0,5 \cdot C_x \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^2 \cdot h_W}{l} - \frac{G_a \cdot a \cdot h_g}{g \cdot l}.$$

РАСЧЁТ ЭНЕРГИИ, ПОЛУЧЕННОЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Рассчитываем мощность электрической машины:

$$P_{\Sigma} = T_{\Sigma} \cdot \omega_{\Sigma} \cdot \eta_{mp},$$

где угловая скорость электрической машины $\omega_{\Sigma} = V i_{mp} / r_{k0}$; η_{mp} — коэффициент полезного действия трансмиссии.

Так как рассчитанные ранее величины являются мгновенными, выражение для расчёта энергии будет выглядеть следующим образом:

$$E_p = \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad (1)$$

Для упрощения расчёта следует разбить время замедления на элементарные участки. Чем меньше величина такого участка, тем выше точность расчёта. В полученном результате необходимо учесть суммарный коэффициент полезного действия элек-

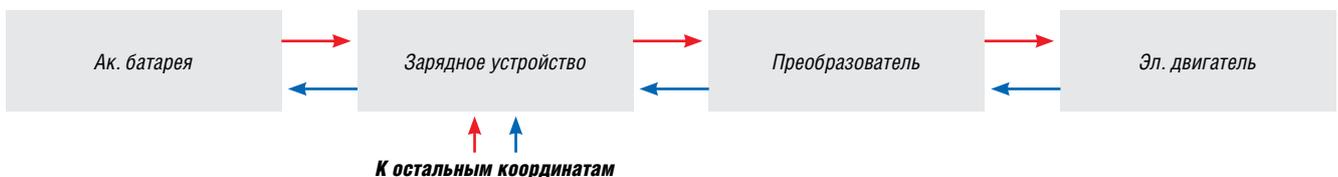


Рисунок 1. Структурная схема

Таблица 1. Результаты расчёта идеализированной модели транспортного средства

V	t 1 сек.			10 сек.			20 сек.			40 сек.		
	EP	ET	%	EP	ET	%	EP	ET	%	EP	ET	%
5,5 м/с	123	77,3	62,8	17,9	8,2	45,8	11,9	4,1	34,5			
11,1 м/с				64,3	34,7	54	35,8	16,1	45			
16,6 м/с				142,6	80,3	56,3	76,1	36,8	48,4	43,8	15,4	35,1
22,2 м/с				250,4	142,9	57	134,5	66,9	49,7	76,2	28,4	37,3

трических элементов, входящих в конструкцию КЭУ.

На основе зависимости (1) был проведён расчёт энергетического баланса идеализированной модели транспортного средства для режимов разгона до скоростей 5,5; 11,1; 16,6 и 22,2 м/с с интенсивностью равномерного разгона и рекуперативного торможения с этих скоростей 1, 10, 20 и 40 секунд. При этом рассчитывалась энергия, потребляемая из аккумуляторной батареи EP и ET, поступающая в результате рекуперативного торможения в аккумуляторную батарею. Результаты расчётов приведены в табл. 1. Значения энергий указаны в килоджоулях (кДж).

Расчёты, результаты которых представлены в табл. 1, как указывалось выше, были проведены при существенных допущениях. В реальности расчёты и проведённые натурные испытания осуществлялись в ходе выполнения работ по теме «Разработка конструкторской и технической документации на компоненты гибридных силовых установок с СГУ для автотранспортной техники» для ОАО «АвтоВАЗ», ОАО «ГАЗ» и ОАО «УАЗ». В цикле ЕЭК ООН № 83 с использованием основных тормозных механизмов, как обусловлено ГОСТ, рекуперативная энергия, возвращённая в АКБ, составляет около 7,5 ÷ 9 % от всей затраченной на движение электроэнергии в цикле. Эти данные получены для тормозного воздействия электропривода на задний мост автомобиля.

При тормозном воздействии электропривода на передний мост автомобиля количество рекуперированной и возвращённой в АКБ энергии составит 20 ÷ 25 % от всей затраченной на движение электроэнергии в цикле ЕЭК ООН № 83.

Результаты расчётов показали приемлемую сходимость с результатами испытаний, проведёнными по государственному контракту № 14.516.11.0114 «Разработка систем управления тяговыми батареями автомобилей с комбинированными энергоустановками и оптимизированными по энергоотдаче показателями».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования продемонстрировали достаточную практическую эффективность рекуперативного торможения. Применение системы рекуперации кинетической энергии при замедлении в автомобилях с КЭУ и электромобилях позволит снизить затраты энергии при движении АТС и улучшить экологические показатели.