

УДК 62-83

Е. А. Смотров, канд. техн. наук,

О. Г. Дашко, Д. В. Вершинин, А. Ю. Сусленко, В. В. Субботин

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕКУПЕРАЦИИ

Аннотация. Предложены соотношения, позволяющие оценить величину возвращаемой энергии при различных значениях динамических и статических сил, действующих на электротранспортное средство. Указаны способы повышения эффективности процесса рекуперации.

Ключевые слова: рекуперация, коэффициент возврата, электротранспортное средство.

E. A. Smotrov, Ph.D.,

O. G. Dashko, D. V. Vershinin, A. Y. Suslenko, V. V. Subbotin

RECUPERATION PROCESS EFFICIENCY ANALYSIS

Abstract. The relationship to assess the return of energy at different values of static and dynamic forces acting on electric vehicles describes in this paper. The ways to increasing the efficiency of recuperation are shown..

Keywords: recuperation, return factor, electric vehicle.

E. A. Смотров, канд. техн. наук,

О. Г. Дашко, Д. В. Вершинин, А. Ю. Сусленко, В. В. Субботин

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РЕКУПЕРАЦІЇ

Анотація. Запропоновано залежності, які дають змогу оцінити кількість енергії, що може бути повернена під час рекуперації при різних динамічних та статичних зусиллях, які діють на електротранспортний засіб. Вказані способи підвищення ефективності процесу рекуперації.

Ключові слова: рекуперація, коефіцієнт повернення, електротранспортний засіб.

Принципиальной особенностью применения электропривода в транспортном средстве (ТС) является использование обратимости электрической машины, т.е. возможность реализации рекуперации при торможении ТС. Количество рекупируемой энергии определяется как параметрами режимов движения ТС (скорость, замедление, масса), так и реализованной схемой рекуперации [1]. Вопросы энергетики процесса рекуперации посвящено много работ [4], но отсутствует оценка предельных возможностей процесса в реальном ТС.

Уровень энергии, отдаваемой в источник при торможении, определяет предельные характеристики рекуператора – требуемую емкость суперконденсатора, токи ключей рекуператора и т.д. Целью статьи является оценка количества возвращаемой энергии во время торможения при различной интенсивности динамических процессов с учетом потерь энергии.

Для оценки эффективности системы рекуперации электрического ТС (ЭТС) рассмотрим предельный режим, при котором ЭТС массой m , коэффициентом лобового сопротивления c_x , площадью лобового сопротивления S при

плотности воздуха ρ разгоняется с максимальным ускорением a_p до скорости v на дороге с коэффициентом сопротивления качению f_0 и затем электрически тормозится с максимальным замедлением a_T до полной остановки.

Составим энергетический баланс исследуемого процесса при движении ЭТС на ровной горизонтальной поверхности. На него действуют силы:

трения качения

$$F_{\text{тр}} = f_0 mg, \quad (1)$$

сопротивления воздуха

$$F_{\text{воз}} = \frac{\rho c_x S}{2} v(t)^2, \quad (2)$$

а также динамическая составляющая

$$F_{\text{дин}} = ma_i. \quad (3)$$

Сумму сил трения качения и сопротивления воздуха обозначим как суммарное сопротивление движению

$$F_{\text{сопр}} = F_{\text{тр}} + F_{\text{воз}}. \quad (4)$$

При разгоне к ЭТС необходимо приложить силу

$$F_{\text{разг}} = F_{\text{дин разг}} + F_{\text{сопр}}, \quad (5)$$

при торможении

$$F_{\text{торм}} = F_{\text{дин торм}} - F_{\text{сопр}}. \quad (6)$$

С учетом (1) – (6) при разгоне потребуются энергия:

$$A_{\text{разг}} = A_{\text{дин разг}} + A_{\text{сопр}}. \quad (7)$$

© Смотров Е.А., Дашко О.Г., Вершинин Д.В., Сусленко А.Ю., Субботин В. В., 2012

При торможении можно получить энергию

$$A_{\text{торм}} = A_{\text{дин торм}} - A_{\text{сопр}}. \quad (8)$$

В процессе разгона и торможения необходимо учитывать, что КПД процессов преобразования энергии разгона и торможения ($\eta_{\text{разг}}$ и $\eta_{\text{торм}}$) – нелинейные функции, зависящие от скорости и момента. Кроме того, если рекуперация проходит не в идеальный источник питания/накопитель, то необходимо учитывать потери в источнике / накопителе в процессе разгона и торможения.

Представив КПД некоторой средней величиной, получим, что реальная энергия, потребляемая от источника при разгоне,

$$A_{\text{р. разг}} = A_{\text{разг}} / \eta_{\text{разг ср}}. \quad (9)$$

Реальная энергия, которая может быть отдана в источник при торможении,

$$A_{\text{р. торм}} = A_{\text{торм}} \eta_{\text{торм ср}}. \quad (10)$$

Для оценки эффективности процесса рекуперации определим отношение реальной рекуперированной энергии при торможении к реальной затраченной энергии при разгоне

$$K_{\text{возв р}} = \frac{A_{\text{р. торм}}}{A_{\text{р. разг}}}.$$

С учетом (7)–(10):

$$K_{\text{возв р}} = \frac{A_{\text{дин торм}} - A_{\text{сопр}}}{A_{\text{дин разг}} + A_{\text{сопр}}} \eta_{\text{торм ср}} \eta_{\text{разг ср}}. \quad (11)$$

Преобразуем (11):

$$K_{\text{возв р}} = \left(\frac{A_{\text{дин торм}}}{A_{\text{сопр}}} - 1 \right) \eta_{\text{торм ср}} \eta_{\text{разг ср}} \times \frac{1}{\frac{A_{\text{дин разг}}}{A_{\text{сопр}}} + 1}. \quad (12)$$

Введем понятие коэффициента динамичности ЭТС $K_{\text{дин}}$, который характеризует интенсивность переходных режимов ТС.

$$K_{\text{дин}} = \frac{A_{\text{дин}}}{A_{\text{сопр}}}. \quad (13)$$

Тогда с учетом (13)

$$K_{\text{возв р}} = \frac{K_{\text{дин торм}} - 1}{K_{\text{дин разг}} + 1} \eta_{\text{торм ср}} \eta_{\text{разг ср}}. \quad (14)$$

Идеализированный коэффициент возврата

$$K_{\text{возв и}} = \frac{K_{\text{дин торм}} - 1}{K_{\text{дин разг}} + 1} \quad (15)$$

связан с реальным коэффициентом возврата следующим соотношением:

$$K_{\text{возв р}} = \eta_{\text{торм ср}} \eta_{\text{разг ср}} K_{\text{возв и}}. \quad (16)$$

Величина $\eta_{\text{торм ср}} \eta_{\text{разг ср}}$ составляет порядка 0,7...0,8, тогда

$$K_{\text{возв р}} = 0,7 K_{\text{возв и}} = 0,7 \frac{K_{\text{дин торм}} - 1}{K_{\text{дин разг}} + 1}. \quad (17)$$

На рис. 1 показаны расчетные значения $K_{\text{возв р}}$ для ряда ЭТС при разгоне до максимальной скорости, соответствующие заявленным предельным характеристикам ЭТС, которые сведены в табл. 1. Ускорение при торможении принято равным ускорению при разгоне ($K_{\text{дин торм}} = K_{\text{дин разг}}$), коэффициент сопротивления качения f_0 для всех электромобилей принят одинаковым и равным 0,018.

Рассмотрим подобный цикл на примере опытного образца электробуса «Дукато-Электро» для расчета реального коэффициента возврата [1].

Разгон до 70 км/ч с ускорением 1 м/с² и торможением до нуля с тем же замедлением. В результате расчета получены следующие значения: $M_{\text{тр}} = 308,73$ Н·м, $M_{\text{дин}} = 1748,4$ Н·м, $M_{\text{воз ср}} = 66,87$ Н·м, $M_{\text{разг}} = 2124$ Н·м, $M_{\text{торм}} = -1372,8$ Н·м.

На основании экспериментальных данных КПД электрической машины (рис. 2) получим, что с учетом КПД энергия при разгоне и торможении:

$$A_{\text{разг}} = 1402 \text{ кДж}, A_{\text{торм}} = -579,106 \text{ кДж}.$$

Отсюда коэффициент возврата:

$$K_{\text{возв р}} = 0,413.$$

Анализ различных стандартизированных циклов показывает, что нормируемая величина ускорения (замедления) не превышает «комфортного значения» 1,3 м/с² (табл. 2) Анализ энергетического баланса движения электробуса в городском цикле НАМИ показал, что уровень возвращаемой энергии составляет 0,21 [2]. Для того, чтобы уровень рекуперированной энергии соответствовал расчетным значениям, необходимо применение специальных мер. Так рекуперированная энергия вследствие энергетических ограничений со стороны аккумуляторной батареи составляет 0,12 [3].

1. Заявленные характеристики и расчетные параметры ЭТС

Электромобиль	Tesla Roadster	Mitsubishi i-MiEV	Audi A1 e-tron	Renault FLUENCE Z.E.	Nissan Leaf	Wolswagen Golf blue e-motion
Разгон (км/ч)	96,56	100	100	100	100	100
за (с)	3,7	15,9	10,2	9	11,9	11,8
Максимальная скорость, км/ч	201	130	130	140	144	135
Снаряженная масса, кг	1235	1110	1190	1543	1525	1545
Коэффициент лобового сопротивления, о.е.	0,35	0,33	0,32	0,56	0,29	0,42
Высота, м	1,127	1,61	1,416	1,458	1,55	1,479
Ширина, м	1,852	1,475	1,74	1,813	1,77	1,786
Ускорение, м/с ²	7,25	1,75	2,72	3,09	2,33	2,35
<i>Работа сил при разгоне до скорости 100 км/ч, кДж</i>						
трения	10,8	43,28	29,77	34,06	44,51	44,71
сопротивления воздуха	7,27	37,25	24,05	39,83	28,31	39,14
динамической составляющей	444,3	428,44	459,1	595,3	588,4	596,1
коэффициент динамичности, о.е.	24,56	5,32	8,53	8,06	8,08	7,11
коэффициент возврата, о.е.	0,65	0,48	0,55	0,55	0,55	0,53
<i>Работа сил при разгоне до максимальной скорости, кДж</i>						
трения	46,9	73,15	50,31	66,75	92,29	81,49
сопротивления воздуха	136,52	106,41	68,67	153,03	121,72	130,01
динамической составляющей	1925,2	723,73	775,89	1166,8	1220	1086,3
коэффициент динамичности, о.е.	10,5	4,03	6,52	5,31	5,7	5,14
коэффициент возврата, о.е.	0,58	0,42	0,51	0,48	0,49	0,47

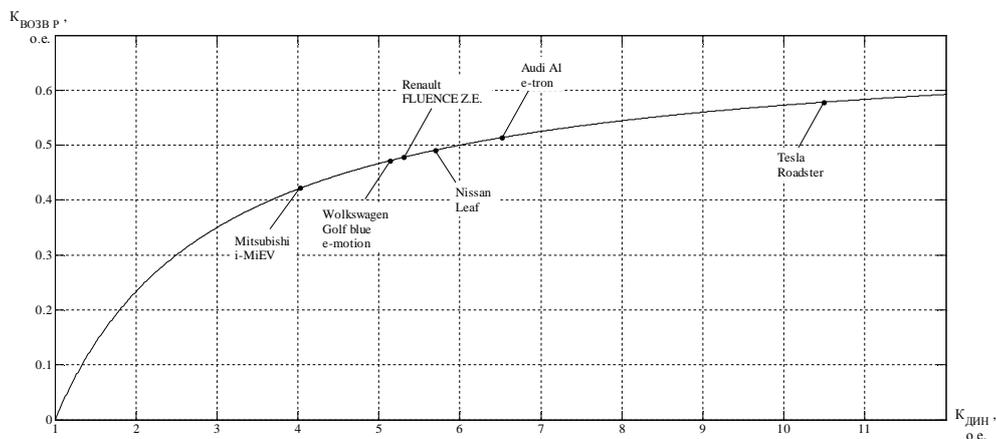


Рис. 1. Зависимость коэффициента $K_{\text{возв}}$ от коэффициента динамичности $K_{\text{дин}}$

2. Ускорения и замедления некоторых реальных циклов, m/c^2

Название цикла	SORT-UITP2003	ECE-15	NEDC	EUDC	НАМИ (ГОСТ 20306-90)
Ускорение разгона	0,62...1,03	0,64...1,3	0,246...0,464	0,463	1...1,1
Замедление	0,46...0,8	0,57...0,97	0,86...0,938	1,107	1...1,1

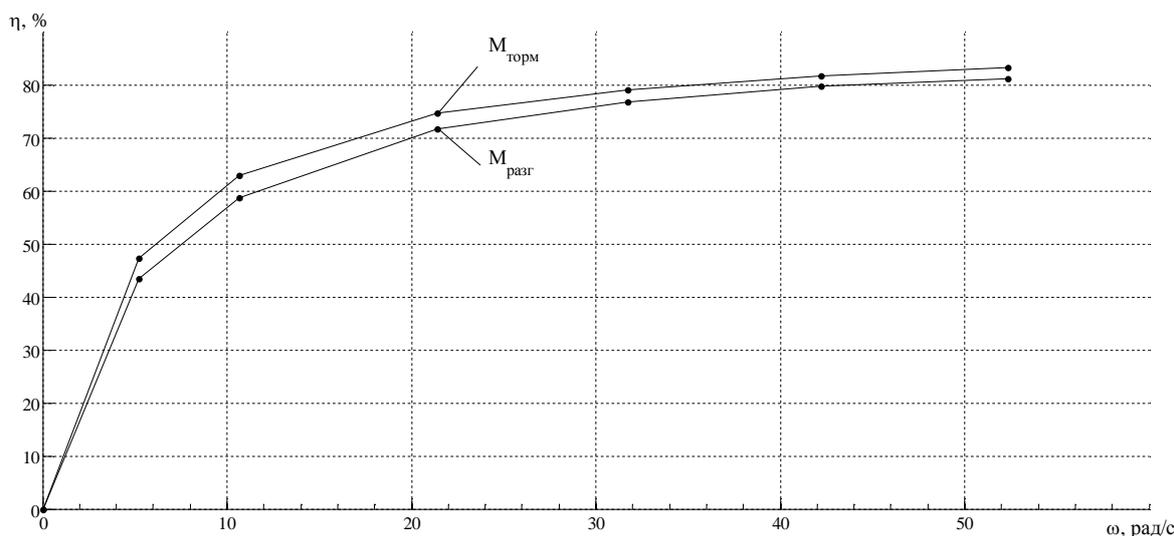


Рис. 2. Экспериментальные зависимости КПД при постоянных моментах

Вывод. Реальная эффективность процесса рекуперации при стандартизованных значениях замедлений составляет величину порядка 0,2...0,4.

Проведенный анализ показал способы повышения эффективности процесса рекуперации:

- уменьшение коэффициента трения качения путем применения специальных шин;
- обеспечение процесса рекуперации во всем диапазоне скоростей ЭТС;
- разработка и сертификация механических и электронных решений, позволяющих эффективно и безопасно разделять механическое и электрическое торможение ЭТС.

Список использованной литературы

1. Вершинин, Д. В. Некоторые аспекты работы автономного источника питания электротранспортного средства. / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2010. – № 01 (77). – С.6–12.

2. Вершинин, Д. В. Определение параметров основных узлов электрической схемы электробуса / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров // *Электромашиностроение и электрооборудование*. – 2009. – Вып.74. – С.10–17.

3. Филонов, А. И. Проблемы рекуперации кинетической энергии на автомобиле с гибридной силовой установкой / А. И. Филонов // МГТУ «МАМИ» – 2009. – С.320–328.

4. B. Cho. Control of A Hybrid Electric Vehicle with Predictive Journey Estimation. Cranfield University School of Engineering. PhD THESIS. – 2008.

Получено 07.10.2012

References

1. Vershinin, D. V. Some aspects of working independent power supply of electric vehicle. / D. V. Vershinin, V. A. Voytenko, E. A. Smotrov // *Electrotechnic and computer systems*. – 2010. – Iss.01 (77). – P.6–12 [in Russian].

2. Vershinin, D. V. Determination of parameters main components of electrical circuits of electro bus./ D. V. Vershinin, V. A. Voytenko, E. A. Smotrov // *Electrical machine-building and electrical equipment.* – 2009. – Iss. 74. – P. 10–17 [in Russian].

3. Filonov, A. I. Problems of recuperation kinetic energy in a car with hybrid power plant / A. I. Filonov // *MSTU «MSEU»»* – 2009. – 3.320–328 [in Russian].

4. B. Cho. Control of a Hybrid Electric Vehicle with Predictive Journey Estimation. Cranfield University School of Engineering. PhD THESIS. – 2008 [in English].



Смотров
Евгений Александрович,
канд. техн. наук,
вед. инж. НТЦ «Станко-
серт»,
тел. 048-728-85-05



Дашко
Олег Григорьевич,
ген. конструктор
ООО НПП «Инкар-М»



Вершинин
Дмитрий Вениаминович,
инж.-исследователь
ОСКБ спец. станков,
тел. 048-728-85-05



Сусленко
Александр Юрьевич,
аспирант Одесск. нац.
политехн. ун-та,
каф. КСУ



Субботин
Виктор Владимирович,
студент Одесск. нац.
политехн. ун-та,
каф. ЭМСКУ