

УДК 62-83

Е. А. Смотров, канд.техн.наук,  
Д. В. Вершинин, В. Г. Герасимьяк

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ МАЛЫХ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**Аннотация.** Рассмотрены особенности рекуперативного торможения в малых электротранспортных средствах. Предложен алгоритм оптимальной рекуперации с целью обеспечения максимума возвращаемой в источник питания энергии. Проанализировано влияние введения такого алгоритма на динамические свойства электротранспортного средства.

**Ключевые слова:** электротранспорт, рекуперация, алгоритм.

Е. А. Smotrov, PhD.,  
D. V. Vershinin, V. G. Gerasymyak

## OPTIMIZATION OF PROCESS REGENERATIVE BRAKING SYSTEM IN ELECTRIC DRIVES OF SMALL ELECTRIC VEHICLES

**Abstract.** The feature of regenerative braking system in small electric vehicles was considered. The algorithm of optimal recovery in terms of maximum energy, returned to the power supply was proposed. The effect of introduction of the algorithm on the dynamic properties of electric vehicles are being analyzed.

**Keywords:** electric vehicle, recuperation, algorithm.

Е. О. Смотров, канд.техн.наук,  
Д. В. Вершинин, В. Г. Герасимьяк

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ МАЛИХ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

**Анотація.** Розглянуто особливості рекуперативного гальмування в малих електротранспортних засобах. Запропоновано алгоритм оптимальної рекуперації з метою забезпечення максимуму поверненої в джерело живлення енергії. Проаналізовано вплив від введення такого алгоритму на динамічні властивості електротранспортного засобу.

**Ключові слова:** електротранспорт, рекуперация, алгоритм.

В процессе исследований электровелосипеда было замечено, что при различных токах торможения мотор-колеса (МК) значения возвращенной в источник питания энергии различные и нет прямой пропорциональности между увеличением тока (момента) торможения и увеличением рекуперированной энергии. Было решено провести теоретические исследования для поиска алгоритма оптимальной рекуперации.

Для исследования был взят электропривод МК с векторным управлением с возможностью работы как в двигательном, так и в генераторном режимах, со следующими параметрами: коэффициент момента  $C_M = 1$  Вс; напряжение холостого хода  $U_{XX} = 40$  В; скорость холостого хода  $N_{XX} = 380$  об/мин; сопротивление фазы  $R_\phi = 0,2$  Ом; индуктивность фазы  $L_\phi = 2$  мГн при диапазоне токов электропривода от 0 до 40 А.

Рекуперация энергии возможна при электрическом торможении и работе электродвигателя в генераторном (рекуперативном) режиме. Так как пульсации тока фазы при частоте коммутации силовых ключей (транзисторов) в пределах 20 кГц очень малы, допустимо рассматривать управляемый выпрямитель, работающий в качестве инвертора, как идеальный источник напряжения величиной  $U$ . Пренебрегая размагничивающим действием тока фазы, можно считать ЭДС МК в качестве идеального источника напряжения. Учитывая особенности регулирования векторного электропривода (одно из них - отсутствие или малое значение реактивной мощности в цепях фаз МК), рассмотрим следующую схему замещения, представленную на рис. 1.

Для создания момента торможения электропривод формирует эффективное напряжение  $U$ , меньшее ЭДС  $E$ , что приводит к созданию тормозного тока  $I$  в электромеханической системе.

© Смотров Е.А., Вершинин Д.В.,  
Герасимьяк В.Г., 2012

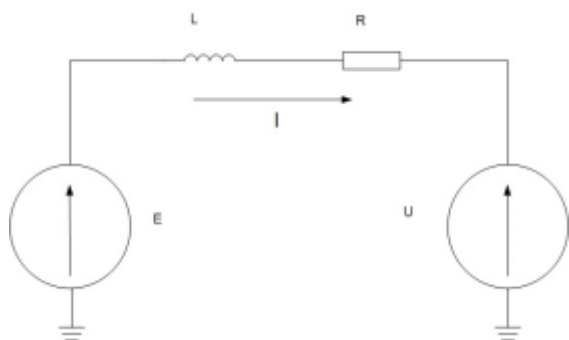


Рис. 1. Схема замещения электропривода при генераторном режиме работы

Для схемы рис. 1 рассмотрим уравнение баланса мощностей. Для случая торможения

$$EI = I^2 R + IL \frac{dI}{dt} + UI. \quad (1)$$

Мощность значения  $UI$ , которая будет передана в аккумуляторную батарею (АКБ) (с учетом небольших потерь в инверторе), назовем полезной. Мощность  $EI$  — это мощность, отбираемая у электромеханического преобразователя, её назовем затраченной мощностью. Мощность, выделяемую на активном сопротивлении  $R$  — мощностью потерь.  $L$  — индуктивность фазы двигателя. Но раз постоянная времени  $T = L / R = 0,01$  с намного меньше времени торможения электропривода, то ее влиянием можно пренебречь ( $L = 0$ ). Поэтому далее запишем:

$$EI = I^2 R + UI. \quad (2)$$

С целью исследования влияния тока на полезную мощность запишем выражение

$$P_{\text{пол}}(E, I) = EI - I^2 R. \quad (3)$$

На рис. 2 построен график этой функции при различных значениях ЭДС  $E$ .

Как видно из графика, при ЭДС от 5 до 15 В в диапазоне рабочих токов электропривода зависимость полезной мощности от тока имеет максимум. Этот максимум рекуперированной энергии возможен при поддержании оптимального тока торможения  $I_{\text{ОПТ}}(E)$ . Мощность отрицательна при необходимости поддержания источником питания требуемого момента (тока) торможения.

Для определения величины максимального тока продифференцируем функцию (3) по току  $I$ :

$$\frac{d}{dI} P_{\text{пол}}(E, I) = E - 2IR. \quad (4)$$

Приравнявая производную нулю и решая уравнение, находим выражение для оптимального тока  $I_{\text{ОПТ}}$ , при котором рекуперированная мощность максимальна,

$$I_{\text{опт}}(E) = \frac{E}{2R}. \quad (5)$$

Действительно, из графиков рис. 2 видно, что максимум мощностей линейно зависит от ЭДС.

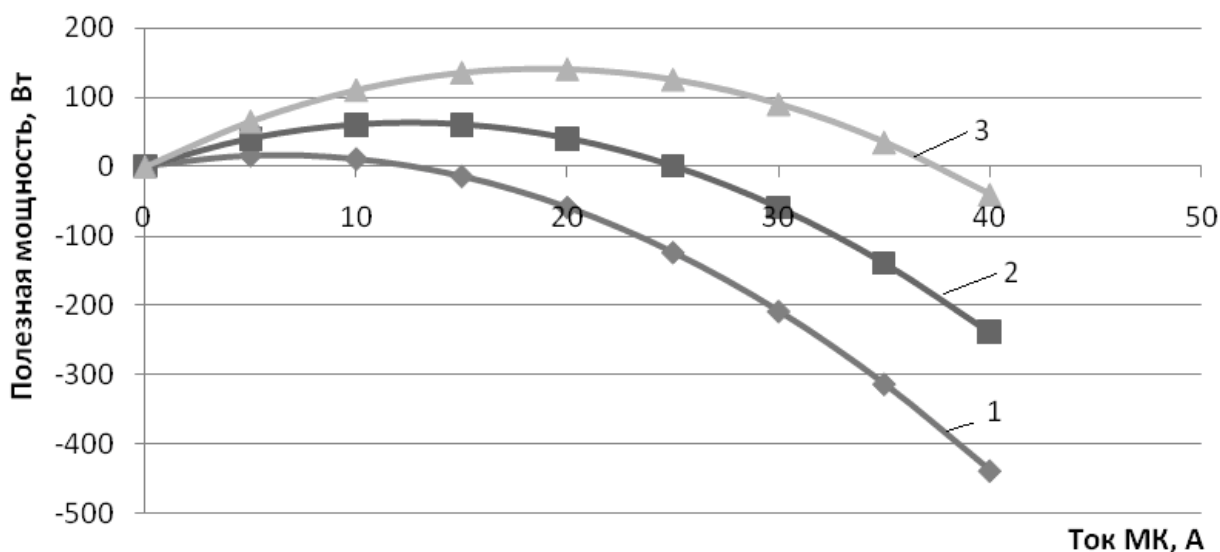


Рис. 2. Зависимость рекуперированной мощности от тока фазы:  
 1 – ЭДС 5 В; 2 – ЭДС 10 В; 3 – ЭДС 15 В

Подставляя выражение для  $I_{опт}(E)$  в выражение (2), можно найти значение напряжения инвертора  $U$ , соответствующее оптимальному току. После несложного преобразования

$$U_{opt}(E) = \frac{E}{2}. \quad (6)$$

Таким образом, при ЭДС МК, равной  $2U$ , имеет место максимально эффективный отбор энергии из электромеханического преобразователя при данном режиме работы электропривода. При торможении ЭДС МК и ток МК будут уменьшаться прямо пропорционально снижению скорости МК. Ток МК определяет момент МК и интенсивность торможения. Из-за этого данный метод затруднительно применять в тех случаях, когда электрическое торможение является основным, т.е. отсутствует или мало влияет механическое торможение.

В исследуемом электровелосипеде орган управления рекуперативным торможением совмещен с механическим тормозом и имеет две зоны регулирования. При возрастающем (начальном) нажатии на ручку тормоза электропривод переходит в режим рекуперативного торможения с заданным ограничением тока, при более сильном нажатии происходит механическое торможение. Такое решение позволяет получить плавное регулирование тормозного момента, при этом велосипедист сам сможет отрегулировать нужный момент торможения.

Предлагается структура регулирования, ограничивающая величину эффективного напряжения на выходе преобразователя снизу на уровне  $E/2$ . Не ограничивая общности,

рассмотрим процессы торможения на примере коллекторного двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов под управлением от данной структуры.

Для сравнения приведем график разгона и торможения двигателя со скорости электровелосипеда 36 км/ч до 0 при включенном алгоритме управления напряжением  $U$  (АУН) и без него. Для получения графика разработана модель в системе *Matlab Simulink*. Модель приведена на рис. 3.

Модель представляет собой систему подчиненного управления двигателем постоянного тока (ДПТ). Блок *PI-RS1* представляет регулятор скорости, настроенный на симметричный оптимум, *PI-RT1* – регулятор тока, настроенный на модульный оптимум. *PR* – регулируемый преобразователь привода, *Electrical* – электрическая часть ДПТ, *Mechanical* – блок механической части ДПТ. *Mc\_react1* – блок, создающий нагрузку реактивного характера. Блоки *Recuperacia* и *Saturation Dynamic* объединяют в себе АУН, а блок *W\_AKB1* ведет подсчет рекуперированной в аккумуляторную батарею (АКБ) энергии. На рис.4 представлены диаграммы переходных процессов разгона и торможения электровелосипеда.

На рис. 4:  $W_n$ ,  $W_{onm}$  – угловая скорость двигателя (рад/с) при торможении без АУН и с его помощью,  $M_n$ ,  $M_{onm}$  – момент торможения двигателя (Нм) и  $E_n$ ,  $E_{onm}$  – энергия (Дж/10), рекуперированная в АКБ при торможении без АУН и с его помощью соответственно. При моделировании учитывался экспериментально полученный статический момент 10 Н·м.

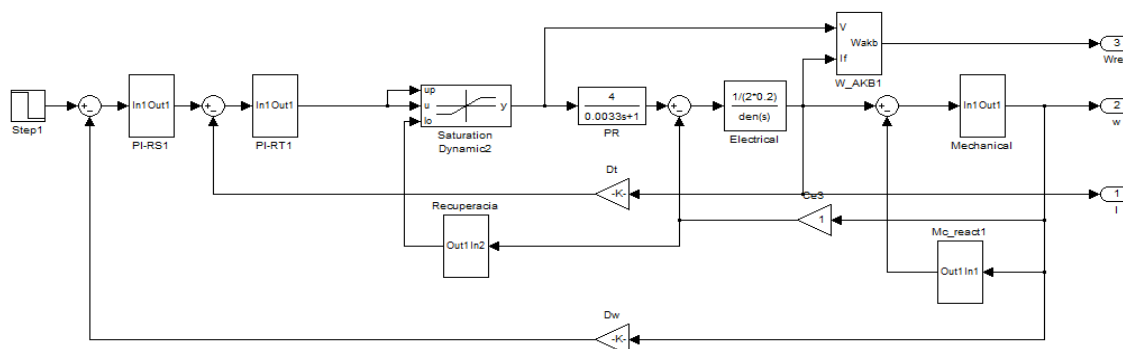


Рис. 3. Структурная схема модели электропривода

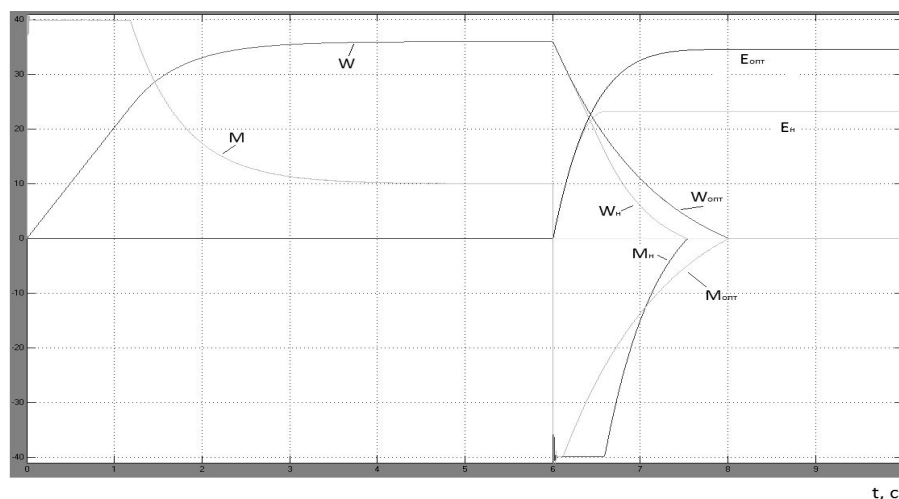


Рис. 4. Диаграммы угловых скоростей, моментов и энергии рекуперации, полученные на модели с помощью АУН и без него

Результаты моделирования свидетельствуют, что конечное значение энергии, рекуперированное в АКБ (источник энергии), в случае работы без АУН – 230 Дж, а при использовании АУН – 345 Дж. Однако время торможения при этом увеличилось с 1,5 до 2 с.

Таким образом, алгоритм работает корректно, он может заметно увеличить количество рекуперированной энергии, что влечет за собой увеличение пробега электротранспорта.

#### Выводы

1. Предложенный алгоритм, несмотря на увеличение времени торможения и некоторое снижение момента, показал возрастание на 50 % энергии, возвращаемой в источник.

2. Дополнительным полезным эффектом является снижение потерь проводимости в двигателе.

3. Данный алгоритм следует рекомендовать в тех случаях, когда электрическое торможение не играет главенствующей роли, т.е. когда некоторое уменьшение момента не приведет к существенному увеличению времени торможения.

#### Список использованной литературы

1. Дугин Г. С. Автомобильный справочник фирмы Bosch / Г. С. Дугин, Е. И. Комаров, Ю. В. Онуфрийчук. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. – 992 с.
2. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. Для вузов / В. И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

Получено 05.07.2012

#### References

1. Dygin G. S. Automotive Handbook Bosch / G. S. Dygin, E. I. Comarov, U. V. Onifruichik. – Moscow: Gmbh KGI «За рулем», 2004. – 992 p. [in Russian].
2. Kluchev V. I. Theory of electric drive: for stud / V. I. Kluchev. – Moscow: Energoatomizdat, 2001. – 704 p. [in Russian].



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



Вершинин  
Дмитрий Вениаминович,  
инженер-исследователь  
ОСКБ Специальных  
станков, тел. 048-728-85-05



Герасимьяк  
Валдис Георгиевич,  
аспирант каф. ЭМС КУ  
Одесского нац.политехн.ун-  
та, тел. 050-392-80-84