

Перелік посилань

1. Хворост М. В. Підвищення ефективності дванадцятипульсних випрямлячів тягових перетворювальних агрегатів метрополітенів з повздовжньою високовольтною лінією живлення постійного струму // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.– 2004. – № 3 – С. 50–54.
2. Хворост М. В., Божко В. В. Силові схеми перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітена з повздовженою лінією живлення // Електротехніка та Електромеханіка. – 2005. – № 1 – С. 106–109.
3. Хворост М. В., Божко В. В. Демпфований вхідний фільтр вольтодобатка на двоопераційних тиристорах дванадцятипульсних випрямлячів тягових перетворювальних агрегатів метрополітена // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – № 3 – С. 41–45.
4. Гончаров Ю. П., Панасенко М. В., Семененко О. І., Хворост М. В. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. За ред. Гончарова Ю. П. – Харків, НТУ «ХПІ», 2007. – 192 с.
5. Гончаров Ю. П., Будоной О. В., Морозов В. Г., Панасенко М. В. та інші. Перетворювальна техніка, ч. II. За ред. Руденка В.С. – Харків, Фоліо, 2000. – 357 с.
6. Хворост М. В., Гончаров Ю. П., Панасенко М. В. та інш. Види комутації та електричні характеристики в електричних колах з ключовими елементами // Електротехніка та Електромеханіка. – 2005. – № 4 – С. 67–72.
7. Электроснабжение контактной сети постоянного тока с питанием повышенным напряжением преобразователя по усиливающему проводу / А. А. Федотов, М. П. Анхимов, М. П. Васильев и др. // Материалы Eltrans'2003, СПб, 2003. – С. 291–296.

Поступила в редакцію 28.09.07 г.

После доработки 20.11.07 г.

Рассмотрена структура источника питания контактной сети на основе последовательного соединения фазо- и широтно регулируемого выпрямителей, которая позволяет (наряду с повышением коэффициента мощности примерно до единицы) реализовать ряд дополнительных полезных функций, касающихся преобразователя электропитания. Предложены узлы коммутационной защиты, позволяющие использовать существующие на промышленном рынке полупроводниковые приборы.

The structure of the contact network power supply on the basis of series connection of angle- and PWM-controlled rectifiers is considered; it allows (alongside with the capacity factor increase almost up to unit) to realize a number of the additional useful functions concerning the power supply converter. The switching protection nodes, allowing to use semi-conductor devices available in the market are offered.

УДК 621.313.222:62–83

П. Д. Андриенко, С. И. Шило, И. Ю. Немудрый

Исследование режимов торможения в системе импульсного регулирования серийного электродвигателя

С помощью разработанной имитационной модели исследованы электромеханические процессы тягового электропривода с серийным электродвигателем в режиме рекуперативного торможения.

В настоящее время в электротранспорте широко применяются электроприводы постоянного тока с двигателями последовательного возбуждения (ДПВ). Это объясняется тем, что изменение момента нагрузки для данных механизмов хорошо согласуется с электромеханической характеристикой ДПВ. Недостатком существующих систем является наличие большого количества контактной аппаратуры, что ведет к снижению надежности и значительно сокращает срок безобслуживаемой работы электроподвижного состава. Важным фактором повышения рентабельности работы электротранспорта в целом может стать замена существующего тягового электропривода (ТЭП) на более современные их виды [1–3].

В работе [3] проведены результаты исследования электромеханических процессов усовершенствованной схемы импульсного регулирования двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (показанной на рис. 1) и сравнения их с процессами в существующих схемах регулирования. Исследуемая схема отличается от классической схемы импульсного регулирования тем, что в ней дополнительно содержатся: диод D3, шунтирующий обмотку F1 возбуждения ДПВ; диод D4, включенный последовательно с обмоткой F1 возбуждения ДПВ.

Проведенное моделирование [3] позволило выполнить сравнительный анализ нескольких схем импульсного регулирования, исходя из которого установ-

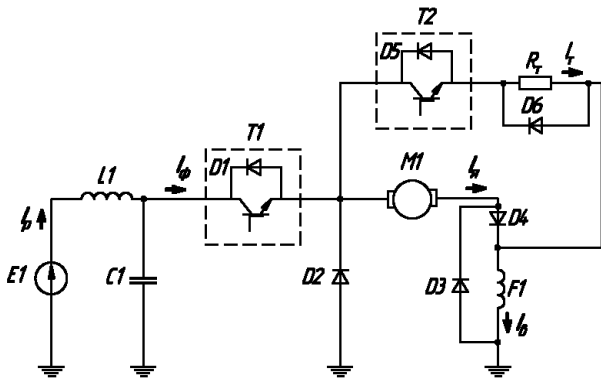


Рис. 1. Усовершенствованная схема импульсного регулирования скорости ДПВ

лено, что модернизированная схема является наиболее эффективной. При введении в схему импульсного регулятора диода D3, шунтирующего обмотку возбуждения, наблюдается снижение скорости затухания тока в данной обмотке. Предлагаемая модернизация, заключающаяся во введении в схему диодов D3 и D4, позволяет реализовать режим электродинамического торможения при самовозбуждении электродвигателя, а также позволяет уйти от применения дополнительных независимых источников тока, упростить техническую реализацию ТЭП и уменьшить затраты на его обслуживание в эксплуатации.

В связи с этим актуально и востребовано практикой проведение исследований переходных электромагнитных процессов в ДПВ при его работе в режиме

рекуперативно-реостатного торможения и самовозбуждения [3], направленное на осуществление качественной и количественной оценки работы схемы в таком режиме.

Целью настоящей статьи является исследование электромагнитных процессов двигателя постоянного тока последовательного возбуждения типа 1ДТ-003.5У с импульсным регулированием частоты вращения в режиме рекуперативно-реостатного торможения.

Исследование электрохимических процессов в предложенной схеме на рис. 1 при рекуперативно-реостатном торможении проводилось на разработанной для этих задач имитационной модели (которая показана рис. 2). Используются следующие обозначения элементов модели на рис. 2:

Е – источник питания (значение напряжения источника питания равно 750В);

Ф – фильтр;

T1/D1 – силовой ключ;

T2 – силовой ключ, включающий тормозной резистор R_r ;

D2, D5 – диоды обратного тока;

M1 – двигатель постоянного тока последовательного возбуждения;

ШИМ – блок широтно-импульсной модуляции, реализующий управление силовым ключом T1;

БВМН – блок вычисления момента нагрузки двигателя M;

D3, D4 – диоды, вводимые в схему при исследовании усовершенствованной схемы импульсного регулирования частоты вращения двигателя;

Pi Current Regulator – импульсный регулятор тока торможения.

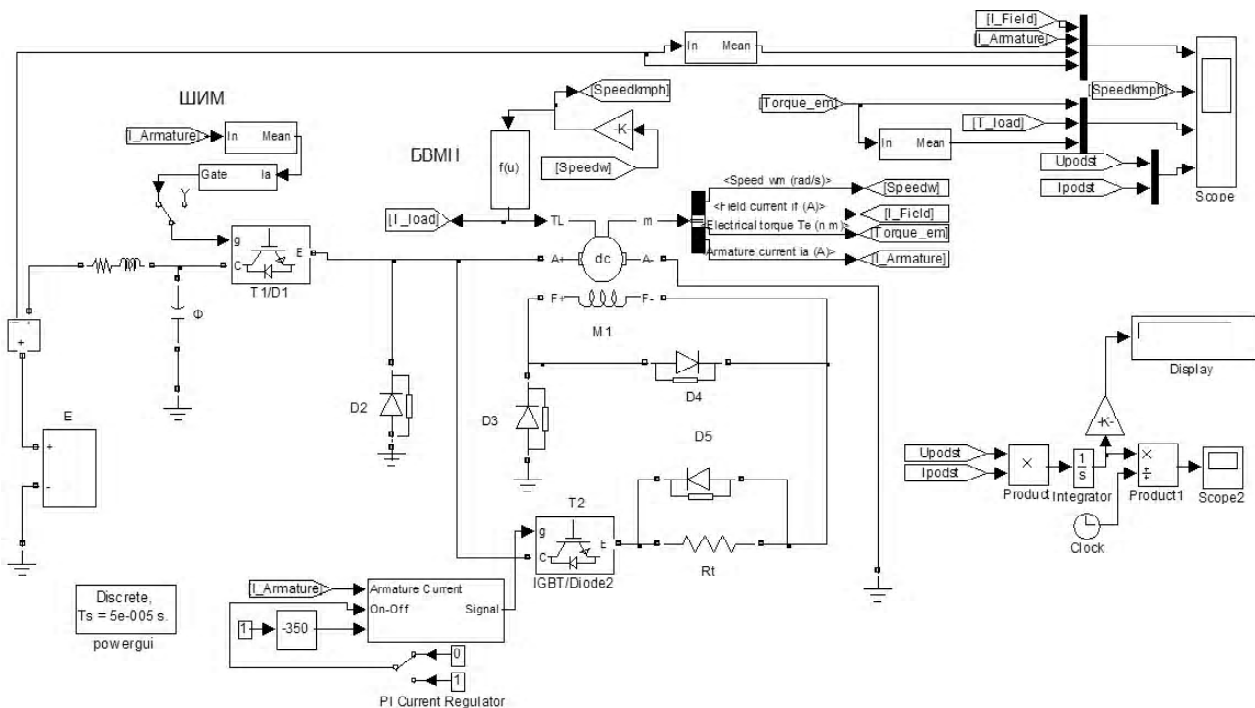


Рис. 2. Модель усовершенствованной схемы импульсного регулирования скорости ДПВ

Исследование проводилось с помощью программного пакета Matlab 2006 при применении библиотеки SimPowerSystem. При моделировании не учитывалось влияние реакции якоря. Нелинейность кривой намагничивания учитывалась таблично (согласно методике, приведенной в [4]).

Параметры имитационной модели заданы применительно к двигателю 1ДТ-003.5У и были предварительно рассчитаны по методике, изложенной в [3]. Номинальные параметры тягового двигателя 1ДТ-003.5У: напряжение $U = 750$ В, мощность $P = 235$ кВт, сила тока $I = 345$ А, частота вращения $n = 1250$ мин⁻¹, масса $m = 2300$ кг. Все дальнейшие расчеты и графики рассчитанных зависимостей приведены в относительных единицах. При этом за базовые значения приняты следующие: электромагнитный момент $M = 5$ кН·м; угловая частота вращения $\omega = 130$ рад/с; ток $I = 345$ А.

В результате моделирования электромеханических процессов ДПВ в режиме динамического торможения, наступающего от номинальной частоты вращения, были получены следующие графические зависимости, показанные на рис. 3: токов якоря $I_{я}$, возбуждения $I_{в}$ и рекуперации $I_{р}$. Исследования показывают, что на интервале времени 0–0,7 с выполняется торможение с током рекуперации, достигающим номинального значения тока якоря двигателя. Далее на интервале времени 0,7–5,5 с ток рекуперации снижается, так как уменьшается ЭДС якорной обмотки вследствие снижения частоты вращения якоря ДПВ. После времени 5,5 с ток рекуперации равен нулю, и система работает в режиме реостатного торможения.

На рис. 4 показаны зависимости среднего значения электромагнитного момента ($M_{эм}$) и угловой

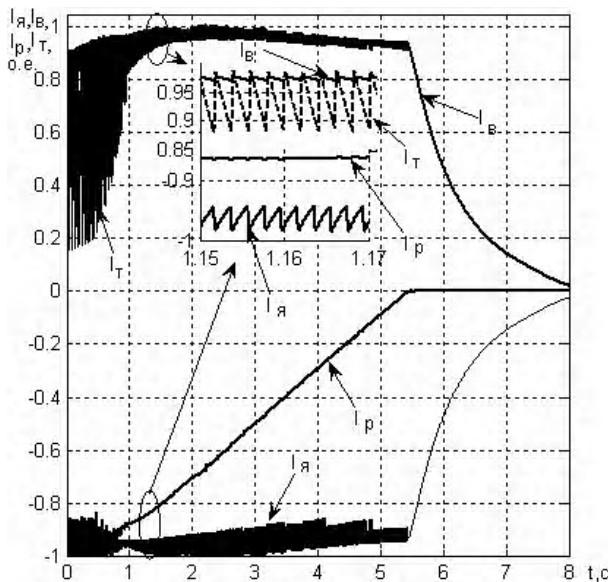


Рис. 3. Зависимости для токов якоря $I_{я}$, возбуждения, $I_{в}$, рекуперации $I_{р}$ и тока $I_{т}$ в тормозном резисторе

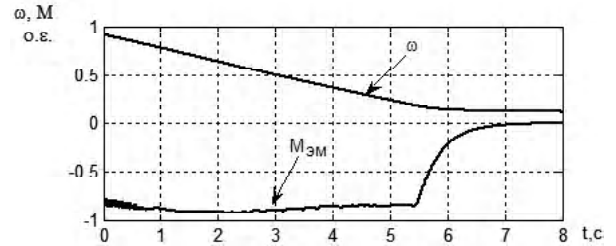


Рис. 4. Зависимость среднего значения электромагнитного момента и угловой скорости ДПВ

скорости (ω) ДПВ в режиме динамического торможения. Как видно, в режимах рекуперативного ($t = 0 - 0,7$ с) и рекуперативно-реостатного торможения ($t = 0,7 - 7,5$ с) ДПВ развивает номинальный тормозной момент, который затем при реостатном торможении плавно уменьшается и в точке $t = 7,8$ с становится равным нулю, а остаточная частота вращения якоря при этом составляет 8 % от номинального значения.

Применение способа широтно-импульсного регулирования (ШИР) тока якоря и возбуждения вызывает импульсное изменение тока рекуперации с амплитудой, равной номинальному значению тока якоря (кривая $I_{ф}$ на рис. 5). Передача таких пульсаций тока в контактную сеть недопустима, поэтому необходима установка и определенный подбор параметров входного C_1L_1 -фильтра.

При исследовании был применен сглаживающий фильтр с параметрами элементов: $L_1 = 11,8$ мГн и $C_1 = 1500$ мкФ. Как видно на рис. 5, ток рекуперации $I_{р}$ в режиме рекуперативного торможения после сглаживания фильтром имеет пульсации амплитудой менее 10 % от номинального тока якоря двигателя и частотой, равной частоте работы ШИР (в данном случае – 1500 Гц). При последующем снижении частоты вращения якоря ДПВ и переходе его в режим рекуперативно-реостатного торможения пульсации тока $I_{р}$ уменьшаются. Таким образом, необходимым является введение в схему упомянутого фильтра для подавления вышеуказанных пульсаций тока рекуперации $I_{р}$.

Также было выполнено исследование режимов работы диодов D3 и D4 при функционировании схемы в режиме динамического торможения, которое

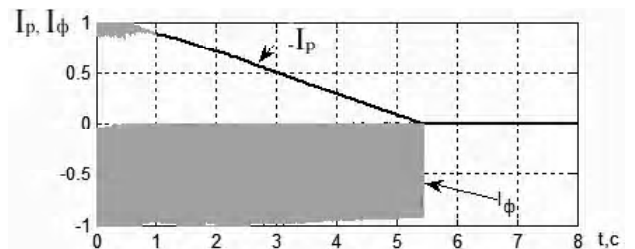


Рис. 5. Иллюстрация эффективности сглаживания пульсаций тока рекуперации входным C_1L_1 -фильтром

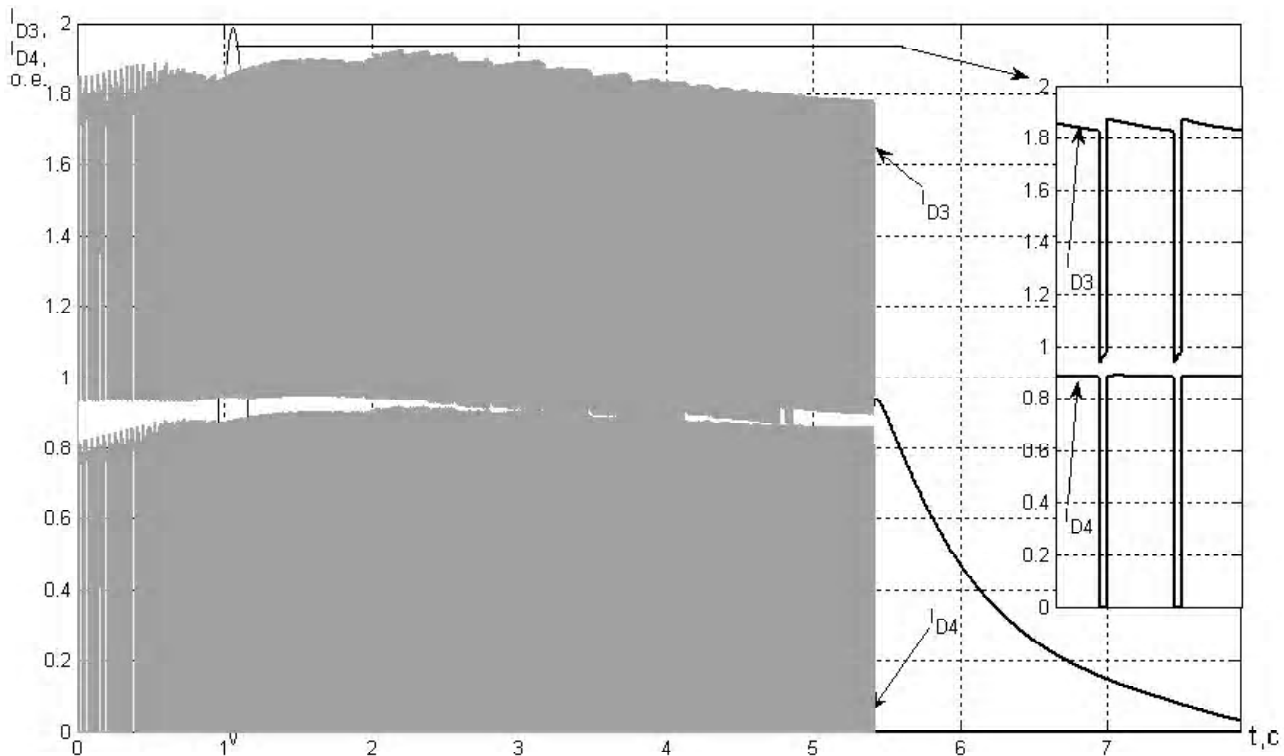


Рис. 6. Зависимости токов через диоды D3 и D4 при работе схемы в режиме динамического торможения

иллюстрируется временными диаграммами токов через указанные диоды, показанными на (рис. 6). Из анализа следует, что диод D3 работает с током, амплитуда которого равна номинальному току торможения, а диод D4 – с двойной амплитудой тока (что следует учитывать при проектировании данной схемы торможения).

Выводы

1. Разработанная имитационная модель позволяет проводить исследования электромагнитных процессов во всех элементах рассматриваемой схемы импульсного регулирования и электромеханических процессов в серийном двигателе постоянного тока в режиме динамического торможения (с относительной погрешностью менее $\pm 7\%$ в сравнении с экспериментом). С помощью данной модели становится возможным определить требуемые параметры входного фильтра, выбрать сопротивление и мощность тормозных резисторов.

2. Выявлено, что диод (D4), которым шунтируется обмотка возбуждения серийного двигателя, работает с удвоенной амплитудой номинального тока торможения, что следует учитывать при выборе этого диода.

3. Установлено, что рассмотренная усовершенствованная схема импульсного регулирования позволяет обеспечить торможение с номинальным тормоз-

ным моментом на валу двигателя от максимальной скорости до скорости, равной 8 % от номинальной.

Перечень ссылок

1. Колпахчян Г. И. Электрическая тяга и преобразователи // Локомотив. – 2000. – № 11. – С. 32–38.
2. Гуткин Л. В., Борисов Г. П. Энергетическая эффективность рекуперативно-реостатного торможения пригородных электропоездов постоянного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 1987. – № 4. – С. 20–25.
3. Андриенко П. Д., Каплиенко А. О., Шило С. И., Немудрый И. Ю. Исследование динамики серийного электродвигателя с различными импульсными схемами регулирования // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 4–8.
4. Перльмутер В. М., Сидоренко В. А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
5. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2003. – 256 с.

Поступила в редакцию 09.11.07 г.

После доработки 25.11.07 г.

За допомогою імітаційної моделі, що була розроблена, досліджено електромеханічні процеси тягового електроприводу з серійним електродвигуном в режимі рекуперативного гальмування.

With the help of the developed simulation model, the electromechanics processes of electro drive braking mode are probed.