

## Импульсно-резисторное регулирование тяговых электродвигателей



Валерий ФЕОКТИСТОВ  
Valery P. FEOKTISTOV

Юрий ЧУБЕРИН  
Yuri Yu. CHUVERIN



Ко Ко ХТЕТ  
Ko Ko HTET

**Феоктистов Валерий Павлович** – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.  
**Чуберин Юрий Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент МИИТ, Москва, Россия.  
**Ко Ко Хтет** – инженер, аспирант МИИТ, Москва, Россия / Янгон, Республика Союз Мьянма.

**Импульсно-резисторное регулирование обеспечивает плавное бесконтактное управление тяговыми электродвигателями постоянного тока и позволяет практически полностью исключить контакторную аппаратуру. Предложена методика расчета таких систем для электропоездов, выполнен анализ регулировочных и пульсационных характеристик. Показано применение схем управления в режимах тяги и электрического торможения.**

**Ключевые слова:** железная дорога, тяговые электродвигатели, постоянный ток, электропоезда, импульсное регулирование, пульсирующий ток, автоматическое регулирование.

**И**мпульсное регулирование – классический способ управления электродвигателями постоянного тока, в частности тяговыми, при питании их от контактной сети или от аккумуляторов. Обычно импульсный преобразователь позволяет исключить реостатные потери в момент пуска тягового электропривода и реализует экономичную схему рекуперативного торможения. Это обеспечивает экономию электроэнергии до 20–25% на электротранспорте, для которого характерен режим движения с частыми остановками (пригородное сообщение, метро, трамвай, троллейбус, в перспективе электромобиль) [1]. Факты такого энергосбережения подтверждаются эксплуатацией электропоездов пригородного сообщения ЭР2И, ЭР12, ЭМ2И, вагонов метро типа ЯУЗА, а также наземного городского электротранспорта [2].

Однако оборудование импульсного регулирования, выполняемого на базе тиристорных или силовых транзисторов IGBT, имеет довольно высокую стоимость, особенно при напряжении 3 кВ, что существенно сдерживает массовое применение импульсных преобразователей в электрической тяге. Между тем, есть

виды электроподвижного состава, где реостатные потери при пуске тяговых двигателей и тормозные потери при остановке поезда незначительны, но важен процесс плавного бесконтактного регулирования тягового электропривода. Это относится к электропоездам, режим движения которых предполагает редкие остановки, но в процессе движения необходима автоматическая стабилизация скорости на уровне заданного ограничения. Такой режим характерен:

- для системы межобластных сообщений «Экспресс», обеспечивающей скоростные перевозки между Москвой и ближайшими областными центрами (техническая скорость 100–110 км/ч, среднее расстояние между остановками 80–90 км);

- для электропоездов системы «Аэро-экспресс», которая связывает Москву со всеми аэропортами столицы (расстояние 55–65 км, движение без промежуточных остановок со скоростью до 75–85 км/ч);

- для ускоренных пригородных сообщений по системе «Спутник» при расстоянии до 50–55 км при 1–2 промежуточных остановках.

В электропоездах подобного типа целесообразно использовать упрощенную схему регулирования, когда импульсный преобразователь не рассчитан на преобразование электроэнергии при полном напряжении источника, а реализует регулирование только сопротивления секции пускового или тормозного резистора. В такой схеме сохраняются пусковые реостатные потери, а при торможении кинетическая энергия поезда гасится в тормозном реостате, но при этом обеспечивается плавное регулирование тока практически без использования контактной аппаратуры. Поскольку режим движения поезда характеризуется редкими остановками, то регулирование скорости осуществляется в основном в зоне ослабления возбуждения, без дополнительных потерь энергии.

Принципиальная электрическая схема импульсно-резисторного регулирования для тягового электропривода (рис. 1а) содержит секции резистора  $R$ , включенные последовательно с обмотками Я-ОВ тяговых двигателей. Одна из секций  $R$  шунти-

рована импульсным прерывателем ИП, остальные секции – контакторами К. Режим ИП задают по входу управления У частотой включения  $f = 1/T$  и коэффициентом заполнения импульсного цикла  $k = t/T$ , где  $t$  – длительность включенного состояния ИП в течение периода  $T$  (рис. 1б).

Для расчета квазистационарного процесса импульсного регулирования тока  $i$  запишем дифференциальные уравнения электромагнитных процессов отдельно для включенного и выключенного состояний ИП.

$$l \frac{di}{dt} + (R(n-1) + r)i = U - e; \quad (1)$$

$$l \frac{di}{dt} + (Rn + r)i = U - e, \quad (2)$$

где  $l$ ,  $r$ ,  $e$  – параметры цепи тяговых двигателей;

$n$  – число секций  $R$ , не шунтированных в рассматриваемый момент времени  $t$  контакторами К, причем  $m \leq n \leq 1$ , где  $m$  – общее число секций  $R$  (на рис. 1а имеем  $m = 4$ ).

Уравнение (1) относится к режиму ИП-вкл., а (2) – ИП-выкл. Для решения этих уравнений целесообразно в соответствии с общепринятой методикой принять допущения [3]:

- изменение тока  $i(t)$  происходит линейно в функции времени в течение каждого характерного интервала периода  $T$  (рис. 1б), что позволяет записать производные в уравнениях (1–2) в виде:

$$\frac{di}{dt} = \frac{\Delta I}{kT} \text{ при ИП-вкл.} \quad (3)$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{\Delta I}{(1-k)T} \text{ при ИП-выкл.} \quad (4)$$

- ввиду небольшой амплитуды пульсаций тока  $\Delta I$  можно в уравнениях (1–2) заменить мгновенные значения тока  $i$  его средним значением  $I$ ;

- по этой же причине, а также из-за сглаживающего действия вихревых токов в тяговом двигателе можно мгновенное значение его ЭДС заменить средним за период значением  $E$ .

С учетом этих допущений дифференциальные уравнения (1–2) приводятся к виду



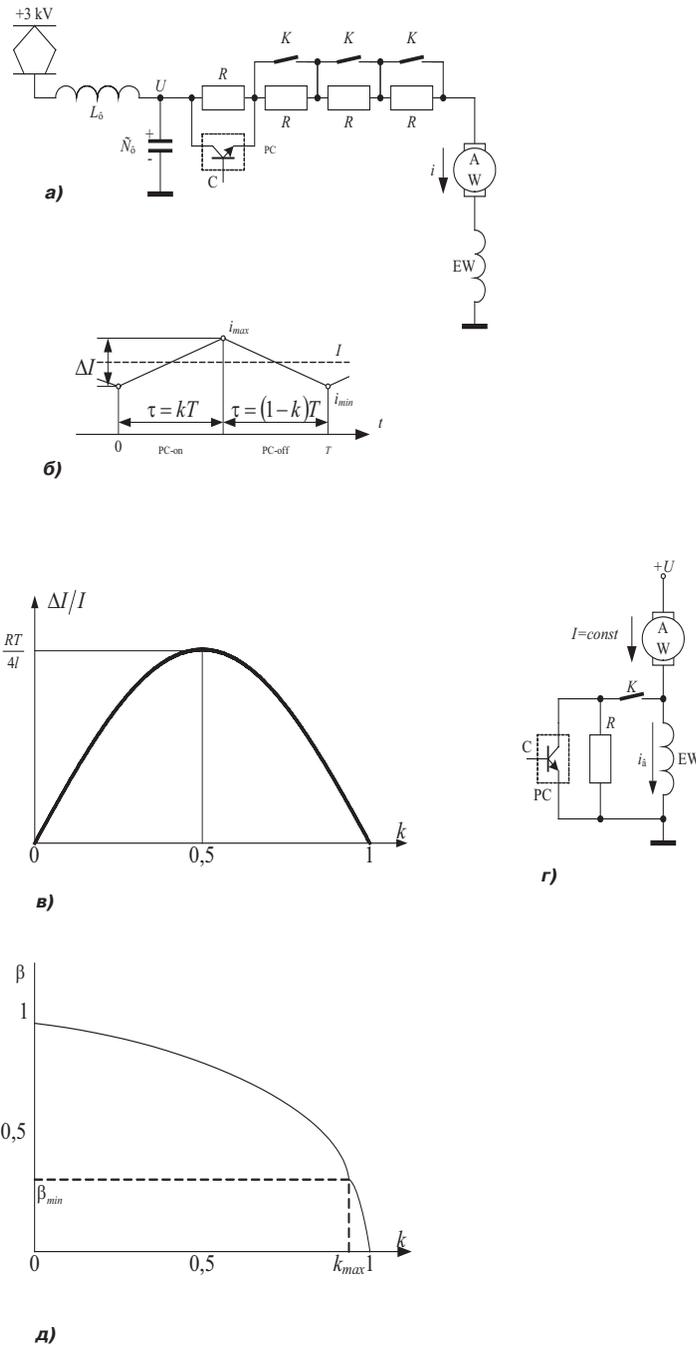


Рис. 1. Импульсно-резисторное регулирование: а) схема; б) диаграмма тока; в) пульсации тока; г) ослабление возбуждения; д) регулировочная характеристика.

$$l \frac{\Delta I}{kT} + (R(n-1) + r)I = U - E; \quad (5)$$

$$I = \frac{U - E}{R(n-k) + r}; \quad (7)$$

$$-l \frac{\Delta I}{(1-k)T} + (Rn + r)I = U - E. \quad (6)$$

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{RTk(1-k)}{l}, \quad (8)$$

Решение этих линейных алгебраических уравнений получим в виде

причем зависимость амплитуды пульсаций от  $k$  имеет обычный для систем импульсного регулирования вид (рис.1в), а макси-

мального значения выражение (8) достигает при  $k = 0,5$ , что соответствует

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\max} = \frac{RT}{4I}. \quad (9)$$

Поскольку пуск тяговых двигателей осуществляется при  $I = const$ , то из выражения (7) следует, что это обеспечивается плавным регулированием  $k$  в пределах  $k = 0-1$  в каждой зоне ступенчатого изменения сопротивления  $nR$ . При этом характер изменения пульсаций на рис. 1в согласно формуле (8) одинаков в каждой зоне. Положение и амплитуда максимума в них остаются также неизменными согласно формуле (9). По сравнению с классической схемой импульсного регулирования, когда импульсный преобразователь включен непосредственно между источником электропитания и тяговыми двигателями, амплитуда пульсаций в рассматриваемой схеме ниже в  $m$  раз, где  $m$  — количество секций  $R$ . Кроме того, в этой схеме не нужен обратный диод, что делает ее особенно предпочтительной, если пусковые и тормозные потери энергии не имеют существенного значения.

В рассматриваемой схеме на рис. 1а преобразователь ИП можно использовать также для регулирования возбуждения, для чего его включают по схеме рис. 1г. При допущениях, аналогичных рассмотренным выше, то есть в предположении, что ток возбуждения  $i_b$  изменяется по линейной пилообразной диаграмме, как на рис. 1б, схема ослабления возбуждения описывается такими же уравнениями. Их решение для регулировочной и пульсационной характеристик в квазистационарном режиме имеет вид:

$$\beta = \frac{I_2}{I} = \left(\frac{r_2}{(1-k)R} + 1\right)^{-1}; \quad (10)$$

$$\frac{\Delta I_2}{I} = \frac{r_2 k T}{I l_2}, \quad (11)$$

где  $r_b, l_b$  — активное сопротивление и индуктивность обмоток возбуждения цепи ТЭД;

$I_b, I$  — ток соответственно обмоток ОВ и Я;

$\beta$  — коэффициент ослабления возбуждения.

Таким образом, импульсный преобразователь ИП обеспечивает ослабление возбуждения до любого минимального значения  $\beta$  путем регулирования коэффициента  $k$ . В частности, большинство электропоездов постоянного тока имеет  $\beta_{\min} = 0,19$ , что позволяет рассчитать соответствующее значение  $k_{\max}$  по формуле (10):

$$k_{\max} = 1 - \frac{\beta_{\min} r_2}{(1 - \beta_{\min}) R}. \quad (12)$$

Поскольку двигатели постоянного тока при  $\beta_{\min}$  работают в предельно допустимом режиме по потенциальным условиям на коллекторе, то в эксплуатации нужен оперативный контроль  $\beta$  при помощи датчиков токов  $i$  и  $i_b$ , включенных в обмотки Я и ОВ. Обычно величины  $\beta_{\min}$  определяют на этапе проектирования и испытаний двигателя [4] для максимально допустимого напряжения на токоприемнике  $U = 4$  кВ. При меньших значениях этого напряжения можно снизить  $\beta_{\min}$ . Такое регулирование целесообразно реализовать в схеме рис. 1г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Импульсно-резисторное регулирование рекомендуется использовать на электропоездах постоянного тока, режим движения которых характеризуется редкими остановками.

2. Рассмотренная система импульсного регулирования позволяет практически полностью исключить контакторную аппаратуру и обеспечивает плавное регулирование тока тяговых двигателей в режимах тяги и электрического торможения, что существенно упрощает применение систем автоматического регулирования и автоведения поезда.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Плакс А. В. Системы управления электроподвижным составом. — М.: УМЦ ЖДТ, 2005. — 360 с.
2. Гаврилов Я. И., Мнацаканов В. А. Вагоны метро с импульсным регулированием. — М.: Транспорт, 1986. — 227 с.
3. Феоктистов В. П. Системы регулирования режимов работы электропоездов постоянного тока с импульсными преобразователями / Дис... док. техн. наук. — М.: МИИТ, 1983. — 171 с.
4. Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А. Тяговые электрические машины. — М.: Транспорт, 1991. — 343 с.

