

ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ЭЛЕКТРОПОЕЗДАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

И. П. Исаев, В. П. Феоктистов и Ю. Ю. Чуверин

Кафедра «Электрическая тяга» Московского института инженеров транспорта

Поступило 21 октября 1985 г.

Представлено проф. др К. Хорват

Abstract

The paper deals with the application of mathematical programming techniques to network analysis and network management in general. First the authors shows the application of linear programming to network scheduling when the problem is to minimize the total crashing cost and the required completion time is given. In the second part the application of goal programming is presented in network scheduling in that case, when all kinds of constraints (time, resource, etc.) are introduced into the problem and the manager has to deal with multiple objectives which may be in conflict.

In the paper all kinds of network scheduling problems mentioned above are illustrated through a detailed numerical example.

1. Введение

В системе пригородных сообщений на железных дорогах СССР используется около 4 тыс. электропоездов постоянного тока 3000 В, которые при суточном пробеге 300—500 км потребляют за год около 15 млн. МВт·ч электроэнергии. Это соответствует удельному расходу 55—60 Вт·ч/т·км брутто.

Поскольку среднее расстояние между остановочными пунктами у пригородных поездов составляет 3—5 км, то пусковые и тормозные потери в сумме достигают 25—30% от общего потребления энергии в пригородном сообщении. Задача повышения энергетической эффективности электропоездов наилучшим образом решается на базе импульсного регулирования. Опыт эксплуатации электропоездов ЭР2И и ЭР12 показал, что внедрение импульсных преобразователей для пуска тяговых двигателей обеспечивает экономию энергии до 10—11%. Опытная система электрического торможения с учетом гашения части энергии на резисторах обеспечивает возврат в контактную сеть еще 12—15% энергии, израсходованной при пуске.

Потребление энергии в пригородном сообщении характеризуется ярко выраженными утренним и вечерним пиками, которые совпадают по времени с пиками энергопотребления крупных городов. Поэтому массовое применение электропоездов с импульсным регулированием обеспечивает снижение пико-

вого энергопотребления в системе пригородных сообщений на 22—26% и является существенным вкладом в решение энергетических проблем крупных городов.

2. Схема моторного вагона

Моторный вагон электропоезда с импульсным регулированием (рис. 1а) целесообразно выполнять так, чтобы максимально использовать возможности работы тяговых двигателей на естественной характеристике. Поэтому

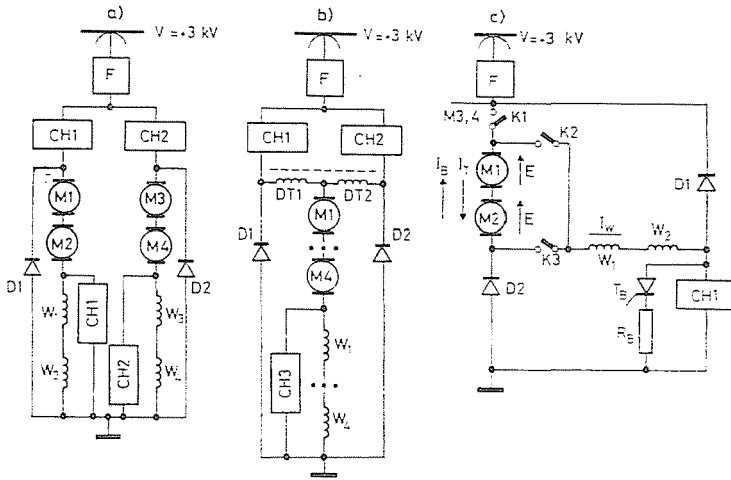


Рис. 1. Компонка моторного вагона с импульсными преобразователями
а) компоновка при двигателях с номинальным напряжением 1,5 кВ; б) компоновка при двигателях с номинальным напряжением 0,75 кВ; в) переключение тягового-тормозного режимов

при двух цепях тяговых двигателей М1—М4 (номинальное напряжение двигателя 1500 В) необходимы преобразователи СН1 и СН2 для регулирования напряжения и преобразователи СН3 и СН4 для регулирования поля. Если вагон выполнен с одной цепью двигателей М1—М4 (номинальное напряжение 750 В), то преобразователи СН1 и СН2 целесообразно включить по 2-фазной схеме с делителем тока ДТ (рис. 1б).

Регулирование двигателей в тяговом режиме осуществляют по мере разгона поезда сначала повышением напряжения при полном поле, потом — ослаблением поля при максимальном напряжении. При этом импульсные преобразователи работают с постоянной частотой 2×400 Гц при изменении коэффициента заполнения в пределах $k = 0,04 + 1$.

Переключение в тормозной режим целесообразно реализовать по схеме рис. 1с; при этом не требуется реверсирования обмоток двигателя. Реверсор

необходим только для изменения направления движения поезда. Тормозной режим в зоне высоких скоростей ($2E > V$) реализуют по схеме независимого возбуждения (замкнуты контакторы К1, К2). При понижении скорости ($2E < V$) размыкают контактор К1, переходя к схеме генератора последовательного возбуждения.

3. Выбор импульсного преобразователя

Основная проблема импульсного регулирования — это реализация импульсного преобразователя. Для целей регулирования тяговых электроприводов наиболее подходят 2-операционные тиристорные прерыватели с параллельной конденсаторной коммутацией. Обычно в мировой практике используют схемы прерывателей трех типов (рис. 2). Схема по рис. 2а обеспечивает выключение главного тиристора Т1 под действием обратного напряжения, равного напряжению на конденсаторе С. Однако, она обладает мягкой внешней характеристикой на начальном этапе регулирования, т. е. при

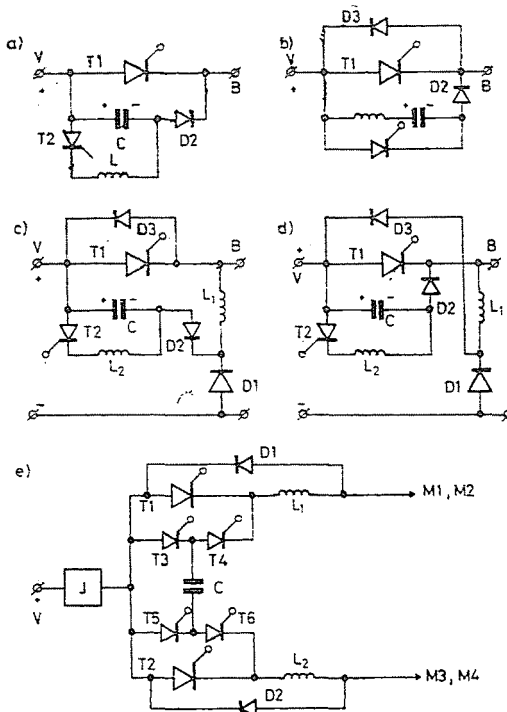


Рис. 2. Импульсные преобразователи

- а) конденсаторная коммутация; б) LC-коммутация; в) с включением коммутирующего дросселя в цепь обратного диода Д1; д) с ускоренным выключением главного тиристора; е) схема с общим коммутирующим устройством на две цепи преобразования

$k \approx k_{\min}$ среднее значение выходного напряжения V_B существенно зависит от тока нагрузки I .

Этот недостаток устранен в схеме по рис. 2, б путем шунтирования главного тиристора Т1 обратным диодом Д3. Эта схема имеет жесткую внешнюю характеристику, но при этом выключение Т1 происходит без действия обратного напряжения, что замедляет выключение в 1,5–2 раза по сравнению со схемой по рис. 2, а. Особенность схемы по рис. 2, б состоит также в том, что она работает с дроссельным дозарядом конденсатора С в каждом периоде, так что напряжение V_{co} на 25–30% превышает напряжение V источника Т.

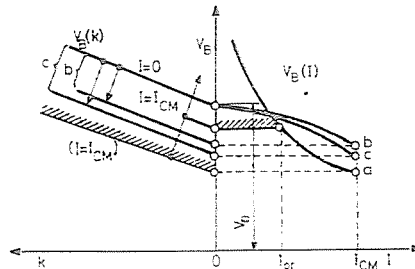


Рис. 3. Внешние и регулировочные характеристики импульсных преобразователей на начальном этапе регулирования

Если дозаряд нежелателен, то дроссель L следует включить в цепь обратного диода Д1 (рис. 2, с); эта схема имеет несколько менее жесткую характеристику, чем предыдущая. Для сравнения на рис. 3 показаны внешние $V_B(I)$ и регулировочные $V_B(k)$ характеристики схем по рис. 2, а, б, с.

Для тяговых приводов необходимы жесткие характеристики, поскольку они позволяют реализовать предельное значение коэффициента сцепления. Поэтому обычно приходится использовать схемы с шунтированием Т1 диодом Д3. Выключение Т1 можно при этом ускорить за счет специальной схемы включения дросселя L (рис. 2, д) — в этом случае сохраняется жесткость внешней характеристики и обеспечивается приложение обратного напряжения к главному тиристор.

4. Расширение диапазона регулирования

Определенный недостаток всех рассмотренных прерывателей связан с наличием подготовительного перезаряда коммутирующего конденсатора С. Этот недостаток можно исключить применением общего устройства конденсаторной коммутации на два прерывателя (рис. 2, е). Такая схема удобна для компоновки моторного вагона по рис. 1, а, б.

Схемы импульсных прерывателей, показанные на рис. 2, могут генерировать выходной импульс с минимальной длительностью

$$\tau_{\min} \approx 2\pi \sqrt{LC}, \quad (1)$$

где L, C — параметры коммутирующего контура. Это соответствует минимальному значению коэффициента заполнения

$$k_{\min} \approx 2\pi f \sqrt{LC}. \quad (2)$$

По условиям плавности трогания поезда нужно обеспечить

$$k_{\min} = \frac{I_0 R}{V_{\max}}, \quad (3)$$

где V_{\max} — предельно допустимое значение напряжения в контактной сети ($V_{\max} = 4$ кВ);

R — сопротивление цепи тяговых двигателей с учетом сглаживающего реактора;

I_0 — начальное значение тока, с которым может быть включен тяговый двигатель при трогании поезда.

Должно быть $k'_{\min} < k_{\min}$, что при принятой в СССР частоте $f = 400$ Гц ставит задачу реализации малых значений k_{\min} . В схемах по рис. 2 это можно обеспечить, если заменить диод Д2 тиристором, включаемым в момент окончания подготовительного перезаряда коммутирующего конденсатора. Этот принцип реализован на электропоездах ЭР12, серийно выпускаемых в СССР. Благодаря этому при $f = 400$ Гц обеспечено $k_{\min} = 0,04$.

При реализации на поезде электрического торможения нужны гораздо меньшие значения k_{\min} (до 0,005). Для этих целей разработаны принципы импульсной модуляции, позволяющие формировать выходной импульс любой длительности, начиная с нуля. На рис. 4, а, в показаны два варианта реализации этого принципа, для чего в схему вводят дополнительный силовой тиристор ДСТ или дополнительный вспомогательный тиристор ДВТ. Включая эти тиристоры с некоторым фазовым сдвигом α по отношению к остальным тиристорам прерывателя, можно задерживать приложение к нагрузке выходного импульса напряжения. В схеме по рис. 4а ДСТ включают с задержкой α по отношению к ТЗ, а в схеме по рис. 4б ДВТ включают с опережением α по отношению к ТЗ — в обеих схемах на начальном этапе регулирования, т. е. пока $\alpha < (k_{\min} T)$, главные тиристоры Т1 не включают. В течение этого времени имеем зависимость выходного напряжения

$$V_B = \left[2\sqrt{LC} \arccos \frac{I}{I_{CM}} - \alpha \right] Vf, \quad (4)$$

где I — ток цепи тяговых двигателей, I_{CM} — амплитуда тока перезаряда конденсатора С; соответствующие выражению (4) внешние и регулировоч-

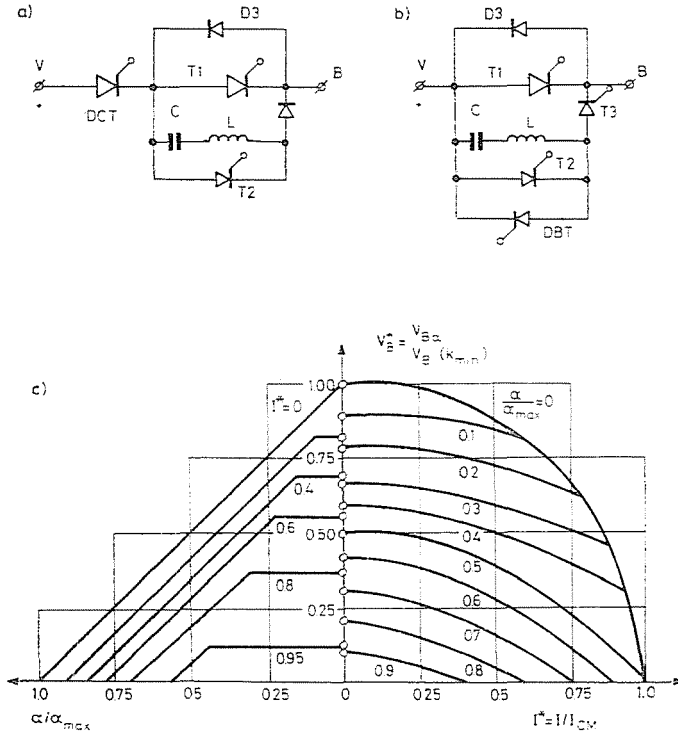


Рис. 4. Преобразователи с расширенным диапазоном регулирования а) схема с дополнительным силовым тиристором DST; б) схема с дополнительным вспомогательным тиристором DBT; в) внешние и регулировочные характеристики схем с расширенным диапазоном регулирования

ные характеристики показаны на рис. 4, в. Характерно, что внешняя характеристика $V_B(I)$ является нелинейной и падающей, а регулировочная характеристика $V_B(\alpha)$ линейна, но параметрически зависит от тока нагрузки.

Применение схем импульсной модуляции решает проблему расширения диапазона регулирования в условиях повышения частоты и при использовании наиболее дешевых крупносерийных тиристоров с большим временем восстановления (100—150 мкс).

5. Сглаживание пульсаций входного тоя

Чтобы исключить мешающее влияние на рельсовые цепи и устройства проводной связи, на входе импульсных преобразователей включают LC — фильтры F (см. рис. 1). На электропоездах с несколькими моторными вагонами можно дополнительно повысить эффективность сглаживания путем параллельного включения фильтров и синхронизации импульсных преоб-

разователей. Обычно синхронизацию реализуют путем взаимного сдвига моментов включения преобразователей на величину $\Delta T = 1/mf$, где m — количество синхронизируемых преобразователей. Однако, поскольку из-за расхождения характеристик тяговых двигателей импульсы тока, потребляемые из источника отдельными преобразователями, имеют различную длительность, то в перичном токе будут содержаться гармоники кратные базовой частоте, т. е. $f, 2f, 3f, \dots$. Содержание этих гармоник можно несколько снизить, если усовершенствовать алгоритм синхронизации, реализовав сдвиг между моментами включения прерывателей в виде

$$\Delta T_i = \frac{1}{mf} - (\tau_i - \tau_{i-1}), \quad (5)$$

где τ_i, τ_{i-1} — длительности i -го и $(i-1)$ -го импульсов. Аналогичная корректировка необходима и в том случае, если импульсы различаются не по длительности, а по амплитуде тока.

Таким образом, проблема сглаживания пульсаций входного тока решается путем повышения рабочей частоты до 2×400 Гц при обеспечении фазового сдвига управления прерывателями в поезде.

Авторами обнаружено, что при наличии на участке нескольких поездов с импульсным регулированием в контактной сети могут наблюдаться биения. При этом амплитуда переменной составляющей тока периодически возрастает с низкой частотой f_s , которая соответствует разности частот задающих импульсных генераторов. Допуск на указанную разность может достигать ± 4 Гц при использовании нестабилизированных генераторов и $\pm 0,01$ Гц, если применяется кварцевая стабилизация. Полностью исключить указанные биения можно путем синхронизации импульсных преобразователей на всех электропоездах путем передачи опорной частоты по радиоканалу.

6. Сглаживание пульсаций тока тяговых двигателей

Особое значение имеют пульсации тока в цепи тягового двигателя — они вызывают пульсационные потери энергии и искрение под щетками. Сглаживание пульсаций тока осуществляется путем включения в цепь двигателя дополнительной индуктивности L_D , величину которой определяют исходя из предельно допустимой величины пульсаций тока I_{\sim} по формуле

$$L_D = \frac{V_{\sim}}{2\pi f I_{\sim}} - L_a - L_s, \quad (6)$$

где V_{\sim} — переменная составляющая импульсного напряжения при $k = 0,5$, равная 850 В;

L_a, L_s — индуктивность якорной обмотки и индуктивность рассеивающей обмотки возбуждения.

Дополнительно для сглаживания пульсаций магнитного потока до величины 0,5—1% применяют шунтирование обмотки возбуждения резистором $R_S = (7 \div 9)R_F$, где R_F — сопротивление обмотки возбуждения. Сглаживание магнитного потока осуществляется также за счет действия вихревых токов, возникающих в корпусе тягового двигателя при пульсациях тока возбуждения.

7. Практические результаты

Практическая реализация систем импульсного регулирования выполнена в СССР путем модернизации электропоездов ЭР2 и путем выпуска новых электропоездов ЭР12, где импульсное регулирование используют только при пуске. При этом обеспечена экономия электроэнергии 10—11%. Подготавливается серийное производство электропоездов ЭР30 с рекуперативным торможением. Их внедрение только на Московском узле обеспечит экономию энергии 470 млн. кВт·ч. в год.

Резюме

В статье указаны основные пути решения проблемы безреостатного регулирования тяговых электродвигателей на электропоездах постоянного тока. Обоснована компоновка моторного вагона, рассмотрены возможные варианты схем импульсных преобразователей и способы сглаживания пульсаций тока в контактной сети и двигателях. Приведены результаты эксплуатации электропоездов с импульсным регулированием на железных дорогах СССР и рассчитаны ожидаемые размеры экономии электроэнергии.

Проф., д. т. н., Исаев, Игорь Петрович

Проф., д. т. н. Феоктистов, Валерий Павлович

Доц., к. т. н. Чуврин, Юрий Юрьевич

} 103055 Москва
} ул. Образцова 15
} МИИТ