

РАЦИОНАЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ ТЯГОВОГО СРЕДСТВА В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ

Представив д.т.н., профессор Костін М.О.

На эксплуатируемых в Украине электровозах постоянного тока (ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11, ДЭ1, ЧС2, ЧС7) регулирование силы тяги и скорости движения осуществляется на основе дискретной системы регулирования мощности, в которой предусмотрено три схемы соединения тяговых электродвигателей (ТЭД) в тяговом режиме. С точки зрения потерь электроэнергии от неравномерного электропотребления такая система является весьма неэффективной [1]. Очень часто при неполновесных составах электровоз с дискретным регулированием мощности обладает избыточной мощностью, которой, как известно, пропорциональны потери электроэнергии [2, 3]. Рассматривая тяговые характеристики электровоза ВЛ8 (рис. 1), и сопоставляя их, например, для схемы СП (возбуждение 36%) и П (возбуждение 100%) видно, что на плоскости возможных мощностей $F \cdot v$ электровоза существует так называемая не перекрытая область регулирования мощности (заштрихованная), в которой отсутствуют естественные характеристики.

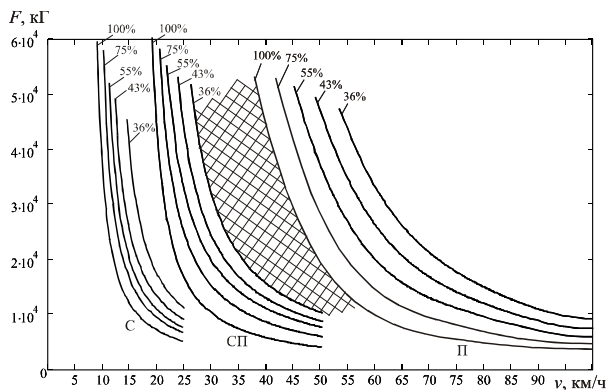


Рис. 1. Тяговые характеристики электровоза ВЛ8 для напряжений на тяговых двигателях 375 В, 750 В, 1500 В

Реостатные характеристики, существующие в этой области, предназначены лишь для кратковременной работы, поскольку неэкономичны и длительность работы на них ограничена нагревом резисторов. В результате этого при установившейся работе электровоза с поездом в определенном диапазоне скоростей в этой области существует значительное расхождение между возможной силой сопротивления движению W и реализуемой силой тяги F , что в данном диа-

пазоне скоростей на СП соединении ТЭД будет обусловлено недостаточной, а на П – избыточной мощностью тягового средства [4].

С другой стороны известно, что у широкорегулируемого тягового электропривода при номинальном напряжении максимум к.п.д., а соответственно и минимум потерь имеют место при номинальной нагрузке двигателя. Например, для ТЭД НБ-406 номинальные величины составляют [5]: напряжение на зажимах двигателя $U_{\text{ном}} = 1500$ В; ток якоря двигателя $I_{\text{яном}} = 340$ А; к.п.д. при этом $\eta_{\text{ном}} = 93,2$ %. Таким образом, наиболее экономичный режим работы ТЭД возможен на П соединении, т.е. при номинальном напряжении на зажимах двигателя.

Зависимость к.п.д. от тока $\eta(I)$ ТЭД для номинального напряжения $U_{\text{ном}} = 1500$ В рассчитывают при помощи выражения [6]

$$\eta(I) = \frac{F_{\text{кд}}(I)v(I)}{U_{\text{ном}} I},$$

где зависимости силы тяги ТЭД и скорости от тока, соответственно $F_{\text{кд}}(I)$ и $v(I)$, получают на основании пересчета зависимостей момента на валу ТЭД $M(I)$ и частоты вращения вала $n(I)$ от тока по выражениям

$$F_{\text{кд}}(I) = \frac{2\mu}{D} M(I), \quad v(I) = 0,188 \frac{D}{\mu} n(I),$$

где D – диаметр бандажа колесной пары; μ – передаточное отношение зубчатой передачи. Электромеханические характеристики $M(I)$ и $n(I)$ двигателя на валу получают экспериментально или из магнитной характеристики $c\Phi(I)$ [6].

Для повышения к.п.д. тяговых двигателей, выравнивания тяговой нагрузки ЭПС в системе тягового электроснабжения, тем самым для повышения коэффициента мощности ЭПС, в незаполненную область мощности между характеристиками СП (возбуждение 36 %) и П (возбуждение 100 %) предлагается ввести дополнительные промежуточные естественные (ходовые) тяговые характеристики. Они могут быть получены оперативным выводением (вре-

менным, в процессе движения, с последующим, при необходимости оперативным восстановлением) групп двигателей (по два двигателя в ветви) при П – соединении согласно схеме рис. 2. Это повысит регулируемость и расширит диапазон регулирования мощности ЭПС (на примере электровоза ВЛ8).

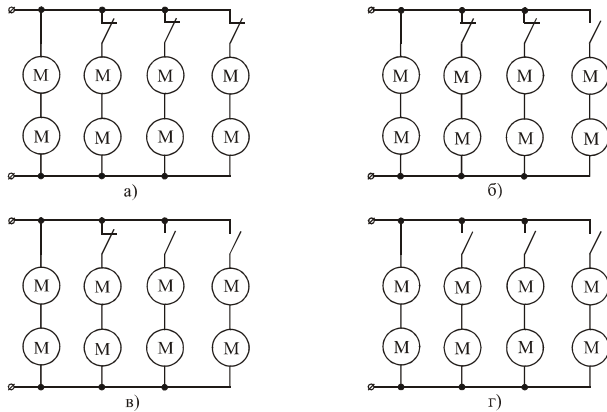


Рис. 2. Схемы выведения групп тяговых двигателей при номинальном напряжении на двигателе 1500 В

В результате получаем, что схема рис. 2 (а) это обычное П – соединение ТЭД, когда электровоз работает на 8 двигателях; схема рис. 2 (б) – схема с выведенной одной группой двигателей, когда электровоз работает на 6 двигателях при том же напряжении, и т.д. Минимальное количество двигателей в данном случае – два (рис. 2, г). В результате получаем, что сила тяги F' на измененной схеме (для приведенных 4 случаев рис. 2) электровоза определяется как отношение силы тяги F на П – соединении к общему числу параллельных ветвей ТЭД (четыре) умноженных на количество оставленных ветвей:

$$а) F' = F; \quad б) F' = \frac{3}{4}F; \quad в) F' = \frac{1}{2}F; \quad г) F' = \frac{1}{4}F.$$

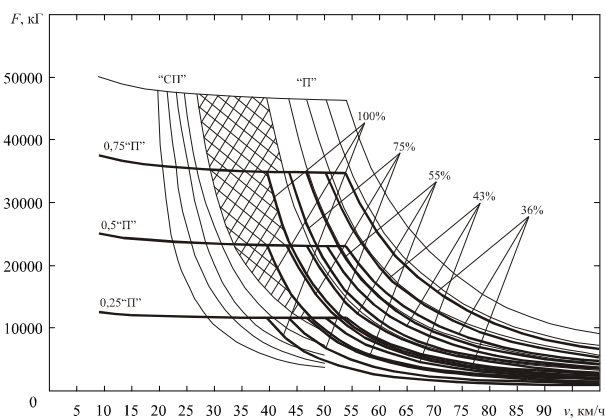


Рис. 3. Дополнительные тяговые характеристики электровоза ВЛ8, полученные выведением одной группы двигателей при номинальном напряжении на двигателе 1500 В

На тяговых характеристиках электровоза, таким образом, появляются дополнительные естественные характеристики $F'(v)$, а незаполненная естественными характеристиками область частично заполняется (рис. 3).

Как видно, полученные дополнительные характеристики приблизительно на 40 % заполняют нерегулируемую область мощности в области скоростей 40...70 км/ч, и таким образом расширяют диапазон рационального регулирования мощности ЭПС в этой области. Кроме этого, некоторые новые характеристики в определенной области скоростей практически совпадают с исходными характеристиками, например (П, ОП1) и (0,75П, ОП2) и т.д., из чего следует, что при равных скоростях движения электровоза на 8 двигателях с полным возбуждением будет реализовываться та же мощность (сила тяги), что и при работе электровоза на 6 двигателях без перегрузки с ослаблением возбуждения 55 %.

Энергоэффективный из рассмотренных двух равных по мощности режимов работы электровоза определим на основании к.п.д. тяговых двигателей. При равных весах поездов и сопротивлении движению при работе электровоза на шести тяговых двигателях вместо восьми (при $U_{ТЭД} = 1500 В$), двигатели будут на 25 % более загружены и т.о. потреблять большие токи. Тем не менее, работая в области допустимых токов (без перегрузки), согласно электромеханическим характеристикам имеем: $\eta(I)_{ОП1} > \eta(I)_{ПП}$, $\eta(I)_{ОП2} > \eta(I)_{ОП1}$ и т.д. в области больших токов двигателя. То есть, при неполновесных поездах применение данного алгоритма регулирования целесообразно. В случае работы электровоза на восьми двигателях они могут быть недогружены, работая в зоне пониженных к.п.д. Для сравнения эффективности равных тяговых характеристик определим к.п.д. электровоза ВЛ8 при помощи электромеханических характеристик ТЭД $F_{кд}(I)$ и $v(I)$ для случая работы на восьми ТЭД на характеристике П, ОП1 и для того же электровоза при работе на шести ТЭД на характеристике 0,75П, ОП2 согласно выражению [6]

$$\eta_3(I_3) = \frac{nF_{кд}(I)v(I_3)}{UI_3}, \quad (*)$$

где n – количество задействованных ТЭД;

I_3 – ток электровоза;

I – ток тягового двигателя;

U – напряжение на токоприемнике электровоза (3000 В);

$F_{\text{кд}}$ – сила тяги одного ТЭД.

При работе электровоза на восьми ТЭД (четырёх ветвях) $I_3 = 4I$; при работе на шести ТЭД (трех ветвях) $I_3 = 3I$.

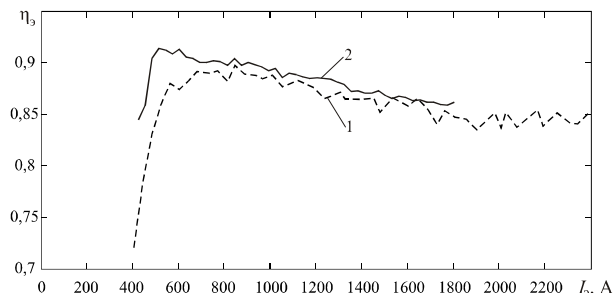
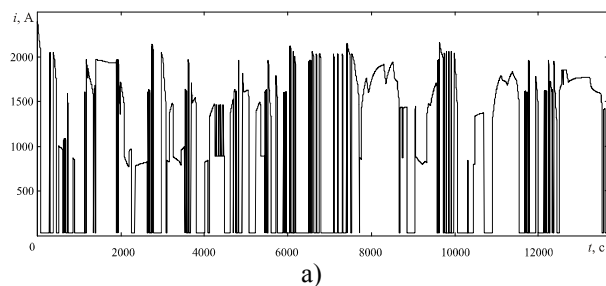


Рис. 4 – Зависимости к.п.д. электровоза от потребляемого тока при напряжении на ТЭД 1500 В: 1 – при работе на восьми тяговых двигателях с ОП1; 2 – при работе на шести тяговых двигателях с ОП2

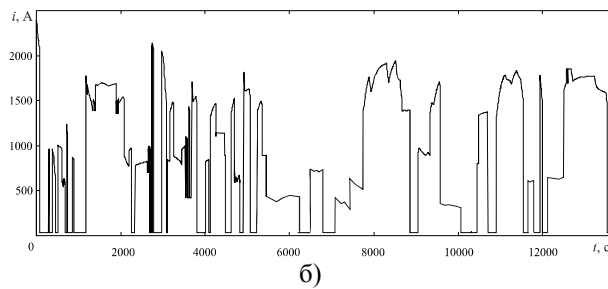
Как видно из рис. 4, полученная по (*) характеристика $\eta_3(I_3)$ для случая работы электровоза ВЛ8 в режиме ОП1 на восьми ТЭД (при напряжении на двигателе 1500 В) лежит несколько ниже той же характеристики электровоза при работе на шести двигателях в режиме ОП2 при том же напряжении на ТЭД, а поэтому второй режим будет более экономичным – с более высоким к.п.д.

Таким образом, применяя изложенный принцип оперативного временного отключения (при необходимости) параллельных ветвей ТЭД при параллельном соединении можно улучшить регулировочные свойства ЭПС, осуществить работу ЭПС в зоне высоких к.п.д., а также создать рациональную загрузку ТЭД при неполновесных поездках и на участках с легким профилем, что особенно эффективно для поддержания скорости движения поезда.

Для сравнения, на примере электровоза ВЛ8 были осуществлены тяговые расчеты для обычной системы регулирования мощности и предложенной расширенной для одного из участков Приднепровской железной дороги (Пятихатки-Чаплино). Графики тягового тока электровоза $i(t)$ приведены на рис. 5.



а)



б)

Рис. 5 – Графики изменения потребляемого тягового тока электровоза ВЛ8 при обычной схеме регулирования скорости (а) и при возможности в схеме отключать ветви тяговых двигателей (б)

Из рис. 5 следует, что при модифицированной схеме (при возможности отключать ветви ТЭД) форма тягового тока электровоза $i(t)$ улучшается (рис. 5, б), т.е. имеет менее импульсный характер и более равномерный в сравнении с формой тока $i(t)$ при обычной схеме регулирования (рис. 5, а). Необходимо отметить, что время хода поезда не изменилось, поскольку дополнительные схемы (рис. 2, б – г) не исключают основную схему (рис. 2, а), а лишь дополняют ее и используются для поддержания скорости поезда электровозом с дискретным регулированием мощности. Дополнительные характеристики позволяют не переходить часто из тяги на выбег при превышении силы тяги над сопротивлением движению, поскольку позволяют подобрать силу тяги с меньшим отклонением от силы сопротивления движению и работать в тяге, потребляя равномерно меньшие токи. Сравнительные характеристики для приведенного тягового расчета приведены в табл. 1, где схема 1 – это существующая схема регулирования скорости электровоза ВЛ8, а схема 2 – схема с возможностью отключения ТЭД.

Таблица 1

Схема	Действующее значение тока электровоза за поездку, А	Среднее значение к.п.д.	Среднее значение коэффициента мощности	Расход электроэнергии в относительных единицах
1	1229	0,82	0,70	1,0
2	1054	0,84	0,79	0,98

Таким образом, предложенная система регулирования позволяет повысить коэффициент мощности ЭПС, стабилизировать тяговую нагрузку, снизить действующее значение тока ЭПС, а тем самым и потери в его силовой цепи и контактной сети, особенно при неполновесных составах. Для реализации данного принци-

па отключения групп ТЭД на параллельном соединении необходимо лишь для существующих в силовой цепи контакторов (их блокировка) предусмотреть на пульте машиниста три кнопки оперативного вывода по одной группе ТЭД, для чего в цепях управления электровоза необходимо произвести несущественные изменения.

Отключение части ветвей с ТЭД имеет также своим преимуществом возможность перехода с одной группы работающих двигателей, у которых температура близка к максимально допустимой, на другую группу двигателей, до этого отключенных (холодных), что облегчает работу ТЭД. Критерием перехода может служить нагрев двигателей, который контролируется темодатчиками. Для этого необходима специальная система управления. Также отключение части ТЭД позволяет минимизировать число коммутаций в силовой цепи, когда благодаря дополнительным тяговым характеристикам ЭПС с дискретным регулированием мощности сила тяги может быть подобрана с меньшим отклонением от силы сопротивления движению, что невозможно при обычной системе регулирования. Это, в свою очередь, продлевает ресурс силовых контакторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабич В. М. Оптимальное регулирование мощности многоосного сцепа в тяге / В. М. Бабич, А. Н. Крыгин // Тезисы докладов «Состояние и перспективы развития электровозостроения в стране». – Новочеркасск, 1991. – С. 12-13.
2. Гетьман Г. К. Выбор оптимальных параметров электровозов для грузовых перевозок / Г. К. Гетьман // Залізничний транспорт України. – 2000. – №3. – С. 47-51.
3. Гетьман Г. К. Метод расчета оптимальных мощностей тягового подвижного состава при дискретном распределении массы поездов / Г. К. Гетьман // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – № 2. – С. 44-47.
4. Сорокин С.В. Анализ потерь электроэнергии в электровозе ВЛ80С и экономия энергозатрат при посекционном регулировании / С. В. Сорокин, В. В. Ширяев // Тезисы докладов «Состояние и перспективы развития электровозостроения в стране». – Новочеркасск, 1991. – С. 13-14.
5. Электровоз ВЛ8. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1973. – 311 с.
6. Теория электрической тяги: учебник [для студ. вузов] / Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н., Озеров М. И. – М.: Транспорт, 1995. – 328 с.