



КПД электровоза в режиме рекуперативного торможения



Олег ТРЕТИННИКОВ

Oleg V. TRETINNIKOV

При нормировании энергозатрат следует учитывать коэффициент полезного действия электровоза в условиях рекуперативного торможения. Проблемы потерь и возврата энергии.

Ключевые слова: электрическая тяга, электровоз, электрическое торможение, коэффициент полезного действия, тяговый электродвигатель.

Третинников Олег Владимирович – аспирант кафедры «Электрическая тяга» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

Существенным преимуществом электрической тяги перед автономной (тепловозной) является наличие рекуперативного торможения. При этом механическая энергия движущегося поезда преобразуется в тяговом электроприводе в электрическую и далее передается в контактную сеть. Там она используется полезно, причем здесь возможны два варианта или их комбинации:

а) вся рекуперлируемая электроэнергия потребляется другими тяговыми потребителями (электровозы и мотор-вагонные электропоезда) в этой фидерной зоне;

б) избыточная энергия рекуперации, которая не может быть использована другими потребителями, инвертируется в первичную сеть.

Поскольку величина рекуперлируемой энергии может быть весьма значительной (10-22% от её потребления), то при нормировании энергозатрат необходимо учитывать коэффициент полезного действия (КПД) электровоза для указанного режима.

В данной статье эта задача рассмотрена применительно к электровозам постоянного тока 3 кВ. Целесообразно предварительно сопоставить понятие КПД для тягового и рекуперативного режимов.

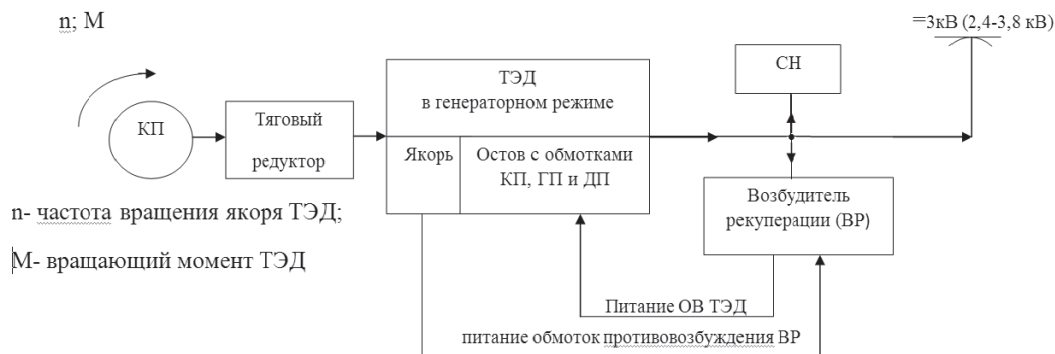


Рис. 1. Схема энергетической цепи электровоза (КП–колесная пара; СН–собственные нужды, т. е. нетяговые потребители).

В технической литературе по электроподвижному составу [1] достаточно четко отработано понятие КПД электровоза в тяговом режиме:

$$\eta_T = \frac{F_K \cdot v}{U \cdot I}, \quad (1)$$

где, $F_K \cdot v$ – полезная мощность, равная произведению касательной силы тяги электровоза F_K на скорость поезда v ;

$U \cdot I$ – полная мощность, потребляемая из контактной сети и равная в системе электрической тяги постоянного тока произведению напряжения U на токоприемнике на ток I .

Режим рекуперации электроподвижного состава существенно отличается от тягового режима по следующим причинам:

- поток кинетической и (или) потенциальной энергии направлен от колесной пары к токоприемнику (рис. 1);

- тяговый электродвигатель (ТЭД) работает в генераторном режиме с независимым возбуждением от мотор-генераторного агрегата-возбудителя рекуперации (ВР) при противовозбуждении последнего (электровозы ВЛ10, ВЛ11, ВЛ15 всех модификаций);

- напряжение на ТЭД и соответственно на токоприемнике электровоза значительно выше, чем в тяговом режиме, оно ограничивается уровнем несколько ниже 4 кВ;

- следует учитывать ограничения по напряжению, току якоря и току независимого возбуждения ТЭД, а также по избыточному проскальзыванию колесных пар.

КПД электровоза по мощности при этом вычисляют по формуле:

$$\eta_p = \frac{U \cdot I}{B_K \cdot v}, \quad (2)$$

где B_K – это тормозная сила электровоза, развиваемая в зоне площадки контакта «колесо-рельс».

Эта сила для наиболее типичного режима движения по вредному спуску с уклоном i при поддержании постоянной скорости v соответствует условию равенства сил [1]

$$B_K + W_0 = W_i, \quad (3)$$

где W_i – горизонтальная составляющая силы тяжести, т. е. суммарного веса электровоза и состава (P+Q) на уклоне i ;

W_0 – основное сопротивление движению поезда.

Главными показателями энергетической цепи электровоза являются КПД и коэффициент потерь. Ниже они рассмотрены для основных узлов этой цепи, показанных на рис. 1.

ТЭД постоянного тока – основное звено цепи рекуперации. Он преобразует механическую энергию движущегося поезда в электрическую. Классификация потерь энергии в ТЭД в генераторном режиме представлена в таблице 1. Соответственно потери мощности в нем рассчитывают по следующей методике.

При анализе потерь использованы основные положения теории электрических машин постоянного тока [2], уточненные применительно к специфическим условиям работы тяговых двигателей при режиме рекуперации с независимым возбуждением.



Классификация потерь энергии в ТЭД в генераторном режиме

Таблица 1

Суммарные потери в ТЭД			
Якорь			Остов (дополнительные полюса, главные полюса, компенсационная обмотка)
Механические (в контакте «коллектор-щетками», в подшипниках, аэродинамические)	Активные (обмотка якоря и щеточные контакты)	Магнитные в сердечнике якоря (гистерезис и вихревые токи)	Активные (в обмотках остова) Потери в обмотках возбуждения ТЭД отнесены к возбудителю рекуперации ВР

Потери в электрической машине постоянного тока принято рассчитывать как сумму

$$\Delta P_{\text{д}} = \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{со}} + \Delta P_{\text{дб}} \tag{4}$$

где $\Delta P_{\text{эл}}$, $\Delta P_{\text{мех}}$, $\Delta P_{\text{дб}}$ — соответственно потери основные в меди обмоток и переходном контакте щеток, механические и добавочные;

$\Delta P_{\text{со}}$ — основные потери в стали якоря.

Основные потери в меди обмоток и переходном контакте щеток определяют по известной формуле

$$\Delta P_{\text{эл}} = I_a^2 \cdot R_{\Sigma} + 2\Delta U_{\text{щ}} \cdot I_a \tag{5}$$

где I_a — ток в обмотках якоря;

R_{Σ} — эквивалентное сопротивление обмоток якоря, компенсационной и добавочных полюсов при соответствующей рабочей температуры этих обмоток;

$2\Delta U_{\text{щ}}$ — падение напряжения в щеточных контактах.

На современных электровозах с питанием от контактной сети постоянного тока 3 кВ используют тяговый электродвигатель ТЛ2 К. Он представляет собой 6-полюсную компенсированную электрическую машину с последовательным возбуждением в тяговом режиме и с независимым возбуждением при рекуперации. Сердечники якоря и главных полюсов выполнены шихтованными и собраны из штампованных листов электротехнической стали марки 1312 толщиной 0,5 мм. Обмотка якоря — простая петлевая состоит из 75 якорных катушек [3].

Расчеты основных потерь в меди обмоток и переходном контакте щеток тягового двигателя ТЛ2 К при нормальном и ослабленном возбуждении выполнены по вы-

ражению (5). Эти потери примерно квадратично зависят от тока. В обмотках возбуждения потери учитываются отдельно, поскольку они питаются от возбудителя рекуперации.

Механические потери включают потери в подшипниках, на трение щеток о коллектор и на аэродинамическое сопротивление поверхности якоря (цилиндрической части и лобовых торцов). Для их определения целесообразно использовать протоколы типовых и периодических испытаний двигателей конкретного типа, аппроксимируя имеющиеся в них данные по формуле квадратичного полинома [4].

$$\Delta P_{\text{мех}} = a \cdot n^2 + b \cdot n \tag{6}$$

где a , b — коэффициенты аппроксимации, определяемые по опытным данным методом наименьших квадратов;

n — частота вращения двигателя, причем для стационарного режима, когда $n = \text{const}$, имеем

$$n = \frac{U_d - I_a \cdot R_{\Sigma}}{C_n \cdot \Phi} \tag{7}$$

где U_d — напряжение на выводах якорной обмотки ТЭД;

C_n — конструктивная постоянная двигателя;

Φ — магнитный поток, определяемый в функции тока возбуждения $I_{\text{в}}$ по характеристике намагничивания.

Для ТЭД электровозов получена своя зависимость:

$$\Delta P_{\text{мех}} = 0,001n^2 + 2,1n \tag{8}$$

Добавочные потери в двигателях постоянного тока определить расчетным путем затруднительно и к тому же они

Таблица 2

Энергетические показатели тяговых электромашин постоянного тока

Показатели	Тяговые двигатели электровозов постоянного тока				
	ДПЭ-400 А	НБ-406 А НБ-406 Б	ТЛ-2 К	АЛ 4846зТ	АЛ 4846еТ
Серия электровоза	ВЛ22 М, ВЛ19	ВЛ8, ВЛ23	ВЛ10	ЧС1	ЧС2, ЧС3
Коэффициент ослабления возбуждения, %	50	36	36	35	40
Передаточное число $m=Z/z$	–	3,905	2,6–2,9	2,27	1,75
Масса двигателя (без зубчатой передачи) G, кг	4300	5400	4760	5200	5250
Часовой режим					
Мощность на валу $P_ч$, кВт	400	525	650	586	700
Ток $I_ч$, А	290	380	466	415	500
Частота вращения $n_ч$, об/мин	710	735	770	600	680
КПД на валу $\eta_ч$, %	92,0	92,1	92,7	–	94,3
Продолжительный режим					
Мощность на валу P_∞ , кВт	310	470	–	508	610
Ток I_∞ , А	225	340	–	360	435
Частота вращения n_∞ , об/мин	770	765	–	630	720
КПД на валу η_∞ , %	92,0	92,1	–	–	94,8
Потери (при ч. р.), Вт:					
в меди всех обмоток	15900	–	29920	–	–
в стали	11400	–	12100	–	–
добавочные	2000	–	3630	–	–
В переходном слое на коллекторе	870	–	2300	–	–
На трение (щеток, подшипников)	2550	–	2232	–	–
Всего	32720	–	56082	–	–
Полезная мощность	402,28	–	64,918	–	–
Потребляемая мощность, кВт	435	–	700	–	–
КПД, %	92,0	–	92,8	–	–

не отличаются большой точностью. Поэтому ГОСТ 183-55 “Машины электрические” рекомендует учитывать добавочные потери приближенно, оценивая их суммарную величину некомпенсированных машин постоянного тока в размере 1% от электрической мощности машины, а для машин с компенсационной обмоткой – 0,5% [5].

Основные потери в стали якоря определяются по формуле [6]:

$$\Delta P_{co} = k_T (p_z \cdot G_z + p_a \cdot G_a) \quad (9)$$

где k_T – эмпирический коэффициент увеличения потерь в стали из-за неидеальности шихтовки и наклепа пластин при штамповке;

p_z, p_a – удельные потери соответственно в зубцах и сердечнике якоря;

G_z, G_a – соответственно масса зубцов и сердечника якоря.

Удельные потери в стали равны

$$p_c = p_0 \left[\alpha_1 \frac{f}{f_0} + \beta_1 \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right] \left(\frac{B}{B_0} \right)^2, \quad (10)$$

где α_1, β_1 – коэффициенты, учитывающие соотношение потерь соответственно на гистерезис и вихревые токи;

p_0 – удельные потери для данной марки стали при частоте перемагничивания f_0 и индукции B_0 , нормированные по ГОСТ 21427.2-83 [7].

КПД двигателя в генераторном режиме [8]

$$\eta_d = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P_d} = 1 - \frac{\sum \Delta P_d}{P_2 + \sum \Delta P_d} \quad (11)$$

где P_1 – подводимая мощность;
 P_2 – полезная мощность:

$$P_2 = U_r \cdot I_a, \quad (12)$$

где U_r – напряжение на выводах якорной





Таблица 3

Суммарная мощность потери в 8-осном электровозе при рекуперации в номинальном (часовом) режиме

	В тяговых электромашинах	В тяговых редукторах	В возбудителях рекуперации и в обмотках возбуждения	На собственные нужды
Мощность потерь, кВт	448	116	244	126
Потери от суммарной мощности потерь, %	48	12	26	14
Суммарные потери в электровозе, кВт	934			

обмотки ТЭД, при рекуперативном режиме.

В таблице 2 приведены энергетические показатели тяговых машин постоянного тока [9].

В методике расчета потерь для тяговой передачи при опорно-осевом подвешивании тягового двигателя (электровозы ВЛ) различают следующие составляющие указанных потерь: на трение в зубчатых колесах $\Delta P_{ЗК}$, в моторно-осевом подшипнике $\Delta P_{МО}$, в роликовых буксах $\Delta P_{РБ}$ колесной пары, в масле редуктора $\Delta P_{МР}$ — на перемешивание и разбрызгивание масла [10].

$$\Delta P_{ТП} = \Delta P_{ЗК} + \Delta P_{МО} + \Delta P_{РБ} + \Delta P_{МР} \quad (13)$$

Эти потери в режиме рекуперативного

торможения можно оценить на основе международного стандарта МЭК 349, который регламентирует относительное значение потерь в передаче ΔP_3^* в процентах от передаваемой двигателем мощности ΔP_d^* [11]. При постоянном значении вращающего момента M_d потери в передаче пропорциональны скорости v локомотива, что позволяет с учетом зависимости МЭК 349 рассчитать значения потерь для любой тяговой передачи (рис. 2).

Однако эти зависимости не учитывают потери в буксах, которые нужно подsumмировать к зависимостям на рис. 2 и рассчитывать отдельно по известному выражению для потерь на трение

$$\Delta P_{РБ} = 2,725V \cdot \varphi_n \cdot q \cdot \mu_i \frac{D_{II}}{D_K} \quad (14)$$

где φ_n — коэффициент трения качения, приведенный к поверхности вала буксового подшипника (согласно [6] $\varphi_n = 0,002$);

q — осевая нагрузка локомотива ($q = 23 - 25$ т/ось);

μ_i — передаточное отношение;

D_{II}, D_K — внешний диаметр внутреннего кольца подшипника и диаметр бандажа колесной пары.

При определении КПД электровоза в режиме рекуперации кроме потерь в ТЭД должны быть учтены потери во всех элементах энергетической цепи электровоза (рис. 1), включая собственные нужды и возбудитель рекуперации. Эти потери для часового режима сведены в таблицу 3, после чего получено значение КПД электровоза в целом. Поскольку часовой режим является основным при торможении на вредных спусках, то указанное в таблице 3 значение КПД может быть принято при нормировании возврата энергии в тя-

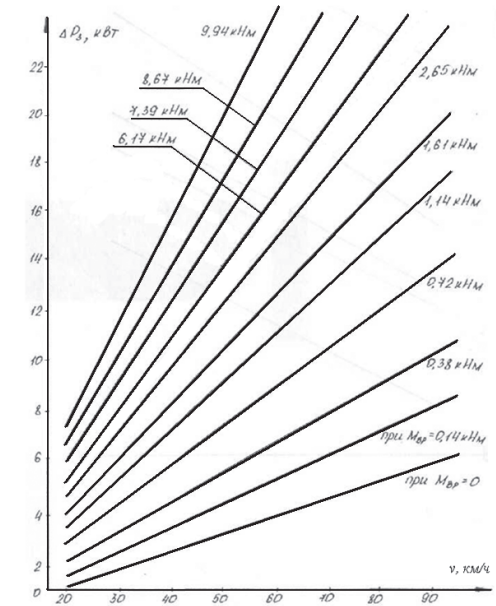


Рис 2. Зависимость потерь в тяговой передаче электровоза от его скорости при разных значениях вращающего момента на валу ТЭД.

говую сеть для каждого вредного спуска.

С помощью этой методики выполнены расчеты КПД электровоза в функции скорости. Полученные значения представлены на рис. 3, причем для удобства их применения в процессе нормирования возврата энергии в качестве исходного параметра введен коэффициент использования весовой нормы α_{II} . Его определяют как соотношение фактического веса состава и весовой нормы. При этом предполагается, что формируется состав полной длины, но из-за малых осевых нагрузок вагонов, в том числе и по причине наличия порожних вагонов, его вес может быть значительно меньше нормы.

ВЫВОДЫ

1. При нормировании возврата электроэнергии электровозов в режиме рекуперации следует учитывать значение КПД его энергетической цепи по диаграммам рис. 3.

2. Некоторые компоненты потерь энергии требуют дальнейшего уточнения, прежде всего это касается потерь в механической передаче, в том числе в зоне контакта «колесо-рельс».

3. Нормирование возврата электроэнергии с учетом КПД электровоза позволит более полно решить проблему энергосбережения в электрической тяге, особенно на горных участках.

ЛИТЕРАТУРА

- Осипов С. И. Теория электрической тяги: Учебник для вузов ж.-д. транспорта. — М.: Маршрут, 2006.
- Курбасов А. С. Проектирование тяговых электродвигателей. — М.: Транспорт, 1987.
- Электровозы ВЛ10 и ВЛ10У: Руководство

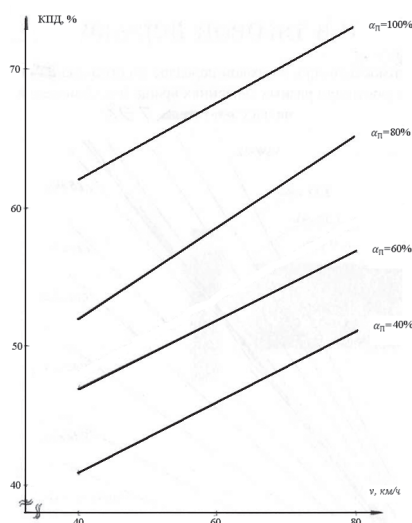


Рис 3. Результирующие характеристики КПД электровоза постоянного тока в режиме рекуперации.

по эксплуатации/Под ред. О. А. Кикнадзе. — М.: Транспорт, 1981.

4. Сорокин С. В. Потери и КПД тягового двигателя постоянного тока. — М., 1989.

5. Находкин М. Д. Электрические машины постоянного тока. — М., 1960.

6. Хвостов В. С. Электрические машины: Машины постоянного тока. — М.: Высшая школа, 1988.

7. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т. 3/Под ред. Ю. В. Корицкого. — 3-е изд. перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

8. Пиотровский Л. М. Электрические машины: Учебник для техникумов. 7-е изд. — Л.: Энергия, 1974.

9. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам./Под ред. А. И. Тищенко. — Т. 1. — М.: Транспорт, 1976.

10. Калихович В. Н. Тяговые приводы локомотивов. — М.: Транспорт, 1983.

11. Revision of IEC Publication 349: rules for rotating electrical machines for rail and road vehicles. International Electrotechnical Commission. Technical Committee. № 9: Electric Traction Equipment. 1987.

EFFICIENCY OF ELECTRIC LOCOMOTIVE DURING RECUPERATIVE BRAKING

Tretinnikov, Oleg V. — Ph. D. student at the department of electric traction of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The author argues necessity of considering efficiency coefficient of electric locomotive during recuperative braking to set power consumption rates and examines the problems of power recuperation and losses.

Key words: electric traction, electric locomotive, electric braking, efficiency coefficient, traction electric engine.

Координаты автора (contact information): Третинников О. В. — olegtretinnikov@mail.ru

