

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЗЕРВОВ АВТОНОМНОГО МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПРОЦЕССА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ

Д. А. Кулагин

*В статье рассмотрены вопросы баланса мощностей моторвагонного подвижного состава при различных режимах ведения поезда. Дано общее описание модели определения энергетических резервов подвижного состава для оценки показателей осуществления процесса рекуперации энергии.*

*Ключевые слова: рекуперация, энергетические показатели, баланс мощностей, моторвагонный подвижной состав, тяговая электропередача.*

Вопросы обеспечения процесса рекуперации энергии при ведении подвижного состава и нормирования показателей полученной при этом энергии являются важными с точки зрения современной тенденции снижения уровня затрат на перевозку продукции железными дорогами. Прогнозирование уровня энергии рекуперации создает предпосылки для нормирования режимов вождения поездов и построения на основе таких нормативов систем автоматического ведения поездов.

Баланс мощностей единицы подвижного состава характеризует распределение мощности по ее составляющим в фиксированный момент времени или в конкретном месте пути. Использование энергии при функционировании подвижного состава состоит из преобразования полезных мощностей и мощностей потерь. Основными составляющими энергопотребления являются:

- тяговая электропередача;
- системы собственных нужд;
- системы обеспечения комфорта (устройства отопления, освещения, вентиляции и кондиционирования и т. п.).

В режиме тяги полная мощность  $\sum P_t$ , которая потребляется дизель-поездом, может быть найдена из выражения

$$\sum P_t = P_M + P_{V.P.} + P_K + P_{Vtrat}, \quad (1)$$

где  $P_M$  – мощность, которая тратится на выполнение механической работы по перемещению дизель-поезда;

$P_{V.P.}$  – мощность системы собственных нужд;

$P_K$  – мощность, которая потребляется устройствами обеспечения комфорта;

$P_{Vtrat}$  – совокупная мощность потерь (механические, электрические, магнитные, тепловые потери в двигателях, преобразователях и системах электроснабжения, других механических и электрических элементах тяговой электропередачи, зубчатых передачах, шестернях и колесных парах и т. п.).

Мощность, которая тратится на выполнение механической работы по перемещению дизель-поезда зависит от скорости движения  $v$  и касательной силы тяги  $F_D$ , которая реализуется тяговой электропередачей:

$$P_M = F_D \cdot v, \quad (2)$$

которая также определяется изменением кинетической и потенциальной энергий и действием при этом сил трения при преодолении основного сопротивления движения и сопротивления при прохождении кривых:

$$P_M = P_{ter} + P_{kin} + P_{pot}, \quad (3)$$

где  $P_{ter}$  – мощность, которая тратится на преодоление сил трения;

$P_{kin}$  – мощность, которая тратится на изменение кинетической энергии подвижного состава;

$P_{pot}$  – мощность, которая тратится на смену потенциальной энергии подвижного состава.

Значение касательной силы тяги определяется из выражения:

$$F_D = \psi_k \cdot Q, \quad (4)$$

где  $\psi_k$  – коэффициент сцепления;

$Q$  – осевая нагрузка на одну колесную пару.

Универсальная формула для определения коэффициента сцепления имеет вид:

$$\psi_k = \frac{30}{100 + v}. \quad (5)$$

Работа касательной силы тяги, которая образовывается при взаимодействии подвижных колес дизель-поезда с рельсами, большей частью тратится на преодоление внешних сил, которые создают сопротивление движению дизель-поезда.

В теории локомотивной тяги принято оценивать результирующую силу неуравновешенных внешних сил сопротивления движению дизель-поезда.

В выражении (3) значение мощности, которая тратится на преодоление сил трения, определяется результирующей силой сопротивления движению подвижного состава  $w_o$  и силой сопротивления при прохождении кривых  $w_{kr}$  и зависит от скорости движения дизель-поезда:

$$P_{ter} = (w_o + w_{kr}) \cdot v. \quad (6)$$

Согласно исследованиям [1, 2] для дизель-поездов, аналогичным которым является современный дизель-поезд ДЕЛ-02, производства ХК «Лугансктепловоз», результирующая сила сопротивления движения определяется выражением

$$w_o = 1,1 + 0,012 \cdot |v| + 0,000678 \cdot v^2. \quad (7)$$

По [3] сила сопротивления движению при преодолении подъемов определяется величиной крутизны уклона по выражению

$$w_i = i - \frac{0,5 \cdot i}{1 + i}, \quad (8)$$

где  $i$  – крутизна уклона, ‰.

Соответственно [3] максимальная крутизна уклона железнодорожных путей Украины и России составляет 15 ‰, а на большинстве участков максимальное среднее значение данной величины составляет 8-9 ‰.

Сопротивление троганию с места дизель-поезда зададим функцией [1-3]

$$w_r = \frac{280}{q_0 + 70}, \quad (9)$$

где  $q_0$  – осевая нагрузка на одну колесную пару.

Аналогично (1) запишем баланс мощностей для других режимов работы подвижного состава:

- торможение;
- движение в режиме выбега.

В режиме выбега мощность потребляется системой собственных нужд и устройствами обеспечения комфорта, т. е. полная мощность  $\sum P_V$ , которая потребляется дизель-поездом, может быть найдена из выражения

$$\sum P_V = P_{V.P.} + P_K + P_{Vtrат\_V}, \quad (10)$$

где  $P_{Vtrат\_V}$  – мощность потерь в режиме выбега.

При этом имеет место соотношение:

$$P_{ter} + P_{kin} + P_{pot} = 0. \quad (11)$$

В режиме торможения с гашением энергии тормозными устройствами (реостатное торможение, использование механических тормозов и т. п.), где имеют место дополнительные потери мощности в тормозных устройствах и цепях  $P_{gal}$ , полная мощность  $\sum P_G$  находится аналогично (10) из выражения:

$$\sum P_G = P_{V.P.} + P_K + P_{Vtrат\_G}, \quad (12)$$

где  $P_{Vtrат\_G}$  – мощность потерь в режиме торможения.

При этом имеет место соотношение:

$$P_{ter} + P_{gal} = P_{kin} + P_{pot}. \quad (13)$$

Мощность торможения определяется касательной тормозной силой подвижного состава  $F_G$ :

$$P_{gal} = F_G \cdot v. \quad (14)$$

Усилие тяги и торможение подвижного состава, которые реализуются тяговыми двигателями дизель-поезда, ограничены в основном сцеплением колес с рельсами [1, 3]. Поэтому для моторвагонных поездов, на которых питание тягового двигателя происходит через преобразователь частоты, следует контролировать значение коэффициента сцепления. При наличии быстродействующих систем автоматического управления необходимо поддерживать значение силы тяги, отвечающей максимальному коэффициенту сцепления [3].

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЗЕРВОВ АВТОНОМНОГО МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПРОЦЕССА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ

В режиме рекуперативного торможения на вредных уклонах при спуске (преодолевается высота большая, чем 10 м и уклон элементов профиля пути большой, чем 4 ‰) имеет место соотношение:

$$P_{pot} = P_{ter} + P_{Vtrat} + P_{V.P.} + P_K + P_{rek}, \quad (15)$$

где  $P_{rek}$  – мощность энергии рекуперации. При торможении до полной остановки:

$$\begin{aligned} P_{pot} + P_{kin} &= \\ &= P_{ter} + P_{Vtrat} + P_{V.P.} + P_K + P_{rek}. \end{aligned} \quad (16)$$

Проанализировав значение мощностей, целесообразно перейти к балансу энергий через соотношение:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt, \quad (17)$$

где  $W$  – энергия;  $t_1, t_2$  – значение начала и конца промежутка времени, за который определяется израсходованная энергия.

Кинетическая энергия движения дизель-поезда может быть найдена из выражения:

$$\begin{aligned} W_{kin} &= \frac{m \cdot v^2}{2} + \sum \frac{J_{k.p.} \cdot \omega_{k.p.}^2}{2} + \\ &+ \sum \frac{J_{p.k.p.} \cdot \omega_{p.k.p.}^2}{2} + \sum \frac{J_{dv} \cdot \omega_{dv}^2}{2}, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $m$  – фактическая масса поезда;

$J_{k.p.}, \omega_{k.p.}$  – соответственно момент инерции и угловая скорость приводной колесной пары или колес с полуосями при использовании дифференцированной передачи вместе со связанными с ними элементами тяговой передачи;

$J_{p.k.p.}, \omega_{p.k.p.}$  – соответственно момент инерции и угловая скорость поддерживающей колесной пары;

$J_{dv}, \omega_{dv}$  – соответственно момент инерции и угловая скорость ротора двигателя, включая части тяговой передачи, закрепленные на валу двигателя.

Если радиусы приводных и поддерживающих колес соответственно  $R_{k.p.}$  и  $R_{p.k.p.}$ , а передаточное число тяговой передачи

$$i^* = \frac{\omega_{dv}}{\omega_{k.p.}}, \quad (19)$$

то угловые скорости вращающихся частей, пренебрегая проскальзыванием, принимают равными [3]:

$$\omega_{k.p.} = \frac{v}{R_{k.p.}}, \quad (20)$$

$$\omega_{p.k.p.} = \frac{v}{R_{p.k.p.}}. \quad (21)$$

Величина  $\frac{J}{R^2}$  имеет размерность массы. Т. е. на основании (18) с учетом (19)-(21) можно записать:

$$\begin{aligned} W_{kin} &= \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{m_o \cdot v^2}{2} = \\ &= (m + m_o) \cdot \frac{v^2}{2}, \end{aligned} \quad (22)$$

где  $m_o$  – эквивалентная масса вращающихся частей.

Принимая обозначение для коэффициента инерции вращающихся частей:

$$\gamma = \frac{m_o}{m}, \quad (23)$$

можно записать (22) в виде:

$$W_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} \cdot (1 + \gamma). \quad (24)$$

Т. е. коэффициент инерции вращающихся частей показывает, насколько увеличивается кинетическая энергия экипажа за счет наличия в нем вращающихся частей. Следует отметить, что полученное соотношение справедливо только для тех частей, которые обрачиваются, обращение которых зависит от поступательного движения поезда. Т. е. коэффициент инерции не учитывает инерционность вентиляторов принудительного охлаждения тяговых двигателей, а также других вспомогательных машин.

Из (15) имеем для рекуперативного торможения на вредных уклонах при спуске

$$\begin{aligned} P_{rek} &= P_{pot} - P_{ter} - \\ &- P_{Vtrat} - P_{V.P.} - P_K, \end{aligned} \quad (25)$$

КУЛАГИН Д. А.

или в виде энергии рекуперации  $W_{rek}$  на основе (17):

$$W_{rek} = \int_{t_1}^{t_2} [P_{pot} - P_{ter} - P_{Vtr} - P_{V.P.} - P_K] dt. \quad (26)$$

При торможении до полной остановки:

$$P_{rek} = P_{pot} + P_{kin} - P_{ter} - P_{Vtr} - P_{V.P.} - P_K, \quad (27)$$

или в виде энергии рекуперации  $W_{rek}$  на основе (17)

$$W_{rek} = \int_{t_1}^{t_2} [P_{pot} + P_{kin} - P_{ter} - P_{Vtr} - P_{V.P.} - P_K] dt. \quad (28)$$

Выделив составляющую, связанную с кинетической энергией, имеем:

$$W_{rek} = \int_{t_1}^{t_2} [P_{pot} - P_{ter} - P_{Vtr} - P_{V.P.} - P_K] dt + W_{kin}. \quad (29)$$

что на основе (24) можно представить как:

$$W_{rek} = \int_{t_1}^{t_2} [P_{pot} - P_{ter} - P_{Vtr} - P_{V.P.} - P_K] dt + \frac{m \cdot v^2}{2} \cdot (1 + \gamma). \quad (30)$$

На практике опытными машинистами кинетическая энергия подвижного состава частично используется рациональным управлением при движении в режиме выбега и динамическом преодолении подъемов.

В режиме выбега кинетическая энергия подвижного состава тратится на работу сил сопротивления на участке, который отвечает пути выбега. Т. е.:

$$W_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} \cdot (1 + \gamma) + \int_{S_1}^{S_2} (w_o + w_{kr}) dS, \quad (31)$$

где расстояние от  $S_1$  к  $S_2$  – это путь, который проходит подвижной состав в режиме выбега.

За время прохождения расстояния в режиме выбега скорость подвижного состава уменьшается по следующему закону:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{kin} - 2 \cdot \int_{S_1}^{S_2} (w_o + w_{kr}) dS}{m \cdot (1 + \gamma)}}. \quad (32)$$

Из полученного выражения видно, что использование выбега без рекуперации энергии приводит лишь к уменьшению скорости движения и при обычном сопротивлении движения и высокой цикличности дает малую эффективность. Тем не менее, перспективным методом использования кинетической энергии автономного моторвагонного подвижного состава является такой, когда эта энергия может быть накоплена в накопительном устройстве, которое находится на данной единице подвижного состава, а потом выделена для использования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги : учебник для вузов железнодорожного транспорта [Текст] / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – М. : Маршрут, 2005. – 448 с.
2. Френкель, С. Я. Техника тяговых расчетов : учебно-методическое пособие [Текст] / С. Я. Френкель. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 72 с.
3. Осипов, С. И. Основы тяги поездов [Текст] / С. И. Осипов, С. С. Осипов. – М. : УМК МПС России, 2000. – 592 с.

*Кулагин Д. А., к.т.н., доцент, докторант, E-mail: [nemix123@rambler.ru](mailto:nemix123@rambler.ru), Украина, г. Запорожье, Запорожский национальный технический университет, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», +3(8-061)769-82-80.*