

# К вопросу выбора мощностных характеристик перспективного автономного тягового подвижного состава

Е.Е. КОССОВ, д-р. техн. наук, проф., В.А. АЗАРЕНКО, канд. техн. наук, М.М. КОМАРИЦКИЙ, инженер

**Сегодня, можно сказать, известны основные требования к новому тяговому подвижному составу и его узлам. Однако, на наш взгляд, остается не вполне решенным вопрос выбора мощностных характеристик перспективного тягового подвижного состава.**

К обязательным требованиям в настоящее время относятся: возможность управления в одно лицо, дистанционное управление движением, тяговая передача переменного тока, регулируемый электрический привод всего вспомогательного оборудования, осушаемый холодильник, электрический тормоз с автоматическим поддержанием заданного тормозного тока, автоматические системы безопасности и экологического контроля, автопрогрев на стоянке, система охраны от несанкционированного доступа и т.п.

Известно, что необходимая мощность и тяга локомотива выбираются из условия проведения по участку поезда заданного веса с заданной технической скоростью. Если известен полигон эксплуатации, то при заданной весовой норме эффективная мощность силовой установки локомотива определяется по соотношению:

$$P_e = \frac{Q(W+i)}{K} \cdot V \cdot \kappa B m, \quad (1)$$

где  $Q$  — вес поезда, кН;

$W$  — полное удельное сопротивление движению при скорости длительного режима, н/кН;

$i$  — величина руководящего уклона, ‰;

$V$  — скорость длительного режима, м/с;

$K$  — коэффициент использования мощности

$$K = \frac{P_\partial}{P_e}, \quad (2)$$

где  $P_\partial$  — мощность локомотива на ободу колес при длительной скорости.

Это соотношение справедливо для предположения, что максимальная мощность силовой установки при движении на подъеме не может быть увеличена более номинальной. Для дизеля это вполне справедливо. Если представить себе, что

силовая установка позволяет на некоторое время увеличить мощность, то формула будет отнесена именно к ней. Например, при использовании газотурбинного двигателя мощность силовой установки можно временно увеличить на 25–30% за счет впрыска воды. Существуют и другие способы. Рассмотрим возможность увеличения эффективной мощности силовой установки за счет включения в силовую цепь локомотива накопителя энергии. Для оценки емкости накопителя можно использовать статистические данные о режимах работы локомотивов. Допустим, существует полигон эксплуатации локомотивов одной серии с известными показателями работы в виде распределения относительно времени работы в зависимости от касательной мощности (см. рисунок).

Принимая за единицу касательную мощность длительного режима, определим коэффициент загрузки локомотива по касательной мощности

$$\psi_\kappa = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \tau_i}{P_\partial \left( \sum_{i=1}^n \tau_i + T_{xx} \right)} = \sum_{i=1}^n \bar{P}_i \bar{\tau}_i, \quad (3)$$

где  $P_i, \tau_i$  — касательная мощность и время единичного режима;

$T_{xx}$  — время работы на холостом ходу.

Периодичность выполнения поездного режима определяется выражением

$$T = \sum_{i=1}^n \tau_i + T_{xx}. \quad (4)$$

Очевидно, при наблюдении за работой тепловозов в эксплуатации величина  $T$  является случайной и может быть определена лишь с некоторой степенью достоверности, однако для оценки энергоемкости накопителя не требуется большой точности в определении  $T$ , так как величину энергоемкости для обеспечения выполнения тяговых операций нужно выбирать с запасом 20–30%.

По многочисленным наблюдениям, коэффициент загрузки силовой установки зависит от полигона эксплуатации и никогда не превышает величины 0,5. То есть средняя мощность силовой установки грузового локомотива составляет не более половины от полной мощности. Если представить себе, что на локомотиве имеется достаточно емкий накопитель энергии, то установленную мощность силовой установки можно было бы снизить в два раза без ущерба для выполнения тяговой работы.

Энергоемкость накопителя на локомотиве ограничена весовыми, объемными



**Таблица 1. Характеристики тягового подвижного состава при применении накопителей энергии**

Наименование показателя	ЧМЭЗ		ДТ1	
	без рекуперации	с рекуперацией	без рекуперации	с рекуперацией
Мощность без накопителя, кВт	960		2 x 550	
Мощность силовой установки при применении накопителя, кВт	400	300	550	300
Энергоемкость накопителя, кВт ч	40		25	
Экономия топлива, %	20	27	25	33
Снижение выбросов вредных веществ, раз	2,4	3,2	2	3,7

ми и стоимостными характеристиками. Поэтому целесообразно определить минимальную энергоемкость накопителя, необходимую для выполнения определенного вида поездной работы с тем, чтобы оценить технические возможности его применения на локомотивах.

Энергия, затраченная локомотивом на обод колеса при выполнении цикла поездных операций, определяется из соотношения:

$$E_c = \psi_k P_o T_y \left( \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i + \bar{\tau}_{xx} \right), \quad (5)$$

где  $\tau_i$ ,  $\tau_{xx}$  — относительное время работы под нагрузкой и на холостом ходу.

Энергия, которую должна выработать силовая установка для выполнения поездных операций за время цикла, будет равна:

$$E_c = \psi_k P_o T_y \left( \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\tau}_i}{K_i} + \bar{\tau}_{xx} \frac{B_{xx}}{B_n} \right), \quad (6)$$

где  $\frac{B_{xx}}{B_n}$  — относительный расход

топлива силовой установкой на холостом ходу;

$K_i$  — коэффициент использования мощности на  $i$ -ом режиме.

Допустим, имеется накопитель энергии, способный отдавать энергию на тягу в длительном режиме и восприни-

мать энергию торможения. Обозначим количество энергии, выработанной на ободах колес при торможении за время принятого цикла  $E_{кинi}$ :

$$E_{кинT} = \sum_{i=1}^m E_{кинi}, \quad (7)$$

где  $E_{кинi}$  — количество энергии, выработанное на ободу колес при рекуперации на  $i$ -ом участке.

С учетом потерь при передаче энергии от обода колес к накопителю получим:

$$E_{кинT} = \sum_{i=1}^m E_{кинi} \eta_{ni}, \quad (8)$$

где  $\eta_{ni} = \frac{E_{ni}}{E_{кинi}}$  — эффективность передачи энергии от обода колес к накопителю.

С учетом энергии торможения получим:

$$E_{cm} = E_c - E_{кинT}.$$

Необходимая средняя мощность силовой установки будет

$$P_{cm} = \frac{E_{cm}}{T_y} = \psi_k P_o \left( \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\tau}_i}{K_i} + \bar{\tau}_{xx} \frac{B_{xx}}{B_n} \right) - T_y \sum_{i=1}^m E_{кинi} \eta_{ni}. \quad (9)$$

Необходимая энергия накопителя может быть определена по соотношению:

$$E_n = P_o T_y \sum_{i=1}^m \frac{(\bar{P}_i - \psi) \bar{\tau}_i}{\eta'_{ni}}, \text{ при } \bar{P}_i > \psi \text{ и } E_n \geq E_{кин, \max} \quad (10)$$

**Таблица 2.**

Тип накопителя	Удельная масса, кг/кДж (кг/кВтч)	Удельный объем, л/кДж (л/кВтч)	Удельная стоимость, руб/кДж (тыс.руб/кВтч)	Эффективность приема энергии
Конденсатор ООО «МНПО Эконд»	0,37 (1300)	0,19 (679)	160 (576)	0,875
Электрохимический конденсатор «Эсма»	0,068 (245)	0,0465 (167)	130 (468)	0,78
Маховичный	0,0042 (15,2)	0,0009 (3,52)	7,5 (27)	0,82
Никель-кадмиевый аккумулятор	0,021 (77,8)	0,012 (44,8)	7,62 (27,4)	0,7
Литий-ионный аккумулятор	0,0003 (1,11)	0,001 (4,17)	(175)	0,74

где  $\eta'_{ni} = \frac{E_{ki}}{E_i}$  — коэффициент эффективности

передачи энергии от накопителя к ободу колес.

$E_{кинi \max}$  — максимальная величина рекуперированной кинетической энергии торможения.

На основании известных данных о режимах работы автономного тягового подвижного состава рассчитаны необходимые мощности накопителей с учетом и без учета рекуперации энергии при торможении и средние установленные мощности силовых установок локомотивов при применении накопителей энергии.

Экономическая эффективность применения накопителей энергии зависит от цены накопителя, эффективности накопителя в цикле заряд-разряд, весогабаритных показателей, стоимости обслуживания при эксплуатации. В табл. 2 приведены некоторые технические характеристики накопителей, применимых на тяговом подвижном составе.

Определенные проблемы представляют собой разработка силовой электросхемы и создание силовых преобразователей, которые должны при широком диапазоне напряжений в накопителе обеспечить передачу энергии тяговым двигателям и восприятие энергии от тяговых двигателей к накопителю. Возникают сложности и при создании системы управления локомотивом.

Рассчитаны рекомендуемые емкости накопителей для дизель-поездов и маневровых тепловозов в зависимости от заданного режима работы. Ожидаемый экономический эффект за счет экономии топлива и улучшения экологических показателей существенно зависит от характеристик накопителя по энергоемкости, эффективности рекуперации энергии торможения и степени возврата накопленной энергии на тягу. Учитывая потери в тяговой передаче и в накопителе, степень использования энергии накопителя может находиться в пределах от 0,6 до 0,75. Кроме того, технико-экономический эффект существенно зависит от стоимости накопителя.

Создание мощных накопителей энергии в габаритах тягового подвижного состава требует существенных финансовых затрат, однако выгоды их применения, к которым относится снижение установленной мощности, выбросов вредных веществ, расхода топлива на тягу поездов и эксплуатационных затрат, бесспорны.