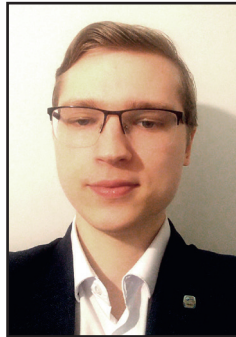




Повышение тяговых характеристик тепловоза с гибридной энергетической установкой



Елена ЛОГИНОВА



Григорий КУЗНЕЦОВ

*Елена Юрьевна Логинова ¹,
Григорий Юрьевич Кузнецов ²*

*^{1, 2} Российский университет транспорта,
Москва, Россия.*

✉ ¹ ejy-loginova@mail.ru, ² kuznetsov_gy@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Обоснована целесообразность применения на тепловозе гибридной энергетической системы с использованием тяговых аккумуляторов. Актуальность решаемой задачи заключается в возможности увеличения весовой нормы поезда без снижения ресурса основного энергетического оборудования тепловоза, что имеет большое значение для повышения эффективности работы железных дорог.

С целью прогнозирования эффективности внедрения на железных дорогах автономных локомотивов с комбинированным источником энергии методом математического моделирования определены тяговые свойства тепловоза, оборудованного батареями тяговых аккумуляторов. Основой метода является динамическая модель движения поезда, в которой локомотив представлен электромеханической системой с электроприводом постоянного тока, где в качестве первичного источника энергии используется дизель-

генераторная установка и литий-ионная аккумуляторная батарея. Показано, что применение на тепловозе гибридного источника энергии с накопителем ёмкостью 1300 ампер-час позволяет на 18 % повысить весовую норму поезда при движении по типовому профилю. Особое внимание уделяется требованиям к эксплуатации тяговых электрических машин для исключения их преждевременного отказа. Установлено, что при движении локомотива с гибридной энергетической установкой с составом расчётного веса и при нормальных условиях увеличение тока нагрузки тяговых электродвигателей не приводит к перегреву их обмоток на расчётном подъёме.

Приведённая модель является универсальной и позволяет рассчитать эффективность работы тепловоза с гибридной энергетической установкой при любых условиях движения.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, автономный локомотив, гибридная энергетическая установка, литий-ионная аккумуляторная батарея, динамическая модель движения поезда, тяговые электрические машины.

Для цитирования: Логинова Е. Ю., Кузнецов Г. Ю. Повышение тяговых характеристик тепловоза с гибридной энергетической установкой // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 3 (100). С. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-3-3>.

*Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.*



ВВЕДЕНИЕ

Исходя из требований повышения мощности автономных локомотивов и снижения расходов на их эксплуатацию (топливо, масло и др.) в настоящее время решается вопрос о разработке тепловозов, способных осуществлять движение с поездами повышенной весовой нормой. Увеличение весовой нормы поезда возможно реализовать за счёт использования гибридных тепловозов, которые используют в качестве дополнительного источника энергии тяговые батареи (накопители) с целью аккумулирования свободной энергии для последующего применения её на тяжёлых режимах движения. Накопители энергии находят широкое применение при использовании в гибридных источниках энергии [1–4].

Накопители на подвижном составе для реализации дополнительной энергии уже применяются за рубежом [5–7]. Для снижения эксплуатационных расходов тепловоза необходимо выбирать накопитель энергии с высокими удельными показателями по ёмкости, плотности запасаемой энергии и сроку службы [8–9]. Одновременно накопители энергии для условий тяги должны иметь низкие весогабаритные показатели и быть рассчитанными на большие токи. Кроме использования накопителей на режимах тяги некоторые опубликованные работы посвящены их применению и для повышения эффективности рекуперативного торможения локомотивов [1; 3; 4].

Количество энергии, которое может быть запасено в накопитель, непосредственно влияет на его стоимость [10].

Применение накопителей энергии на железнодорожном транспорте является комплексной задачей, при решении которой необходимо учитывать работу оборудования локомотива в целом [11–15]. Кроме тяговой батареи энергетическая цепь накопителя содержит дорогостоящие преобразователи энергии на базе силовых электронных ключей со сложным алгоритмом управления. В результате цена энергетического оборудования гибридного тепловоза значительно возрастает, и его создание требует обоснования экономической эффективности. Поэтому расчёт повышения тяговых свойств гибридного тепловоза по сравнению с дизельным является важным этапом разработки и внедрения на автономных локомотивах гибридных источников энергии.

Одна из основных проблем создания гибридных тепловозов – согласованная работа двух силовых агрегатов: дизеля и тягового накопителя энергии (НЭТ). Её решение требует разработки динамической модели энергетической системы тепловоза с гибридным источником энергии и выполнения численных экспериментов по определению его тяговых свойств, что и является *целью* данного исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Энергетическая цепь гибридного тепловоза

Энергетическая цепь гибридного тепловоза предусматривает работу двух источников энергии на тяговые электродвигатели (рис. 1). Применительно к тепловозу с энергетической системой переменного-постоянного тока основной источник энергии состоит из дизеля Д, тягового синхронного генератора (ТСГ) с комбинированной системой управления, выпрямительной установки (ВУ) и тяговых электродвигателей (ТЭД) 1–6. Для возможности перевода электродвигателей в тормозной режим энергетическая система оборудована тормозным переключателем (ТП).

Дополнительный источник энергии включает в себя тяговый накопитель энергии и устройства регулирования заряда и разряда (УРЗР) с системой управления (СУ). Процесс заряда НЭТ осуществляется на тормозных режимах работы тепловоза включением НЭТ на напряжение ТЭД с помощью контактора К2.

На гибридном тепловозе в режиме тяги питание обмоток ТЭД может осуществляться как от ТСГ совместно с накопителем НЭТ, так и только от ТСГ. Ток разряда НЭТ регулируется устройством управления УРЗР, представляющим собой модуль на IGBT-транзисторах и СУ. Устройство УРЗР подключает НЭТ к тяговому приводу локомотива контактором К3 (при замкнутом контакторе К1). В условиях низкого сопротивления движению контактор К3 отключает НЭТ от тягового электропривода, и питание последнего осуществляется от ТСГ через ВУ.

При необходимости НЭТ можно отключить от силовой цепи размыканием контакторов К1, К2 и К3.

Если необходимо использовать электрическую энергию только тяговых накопителей, например, для работы на станционных путях,

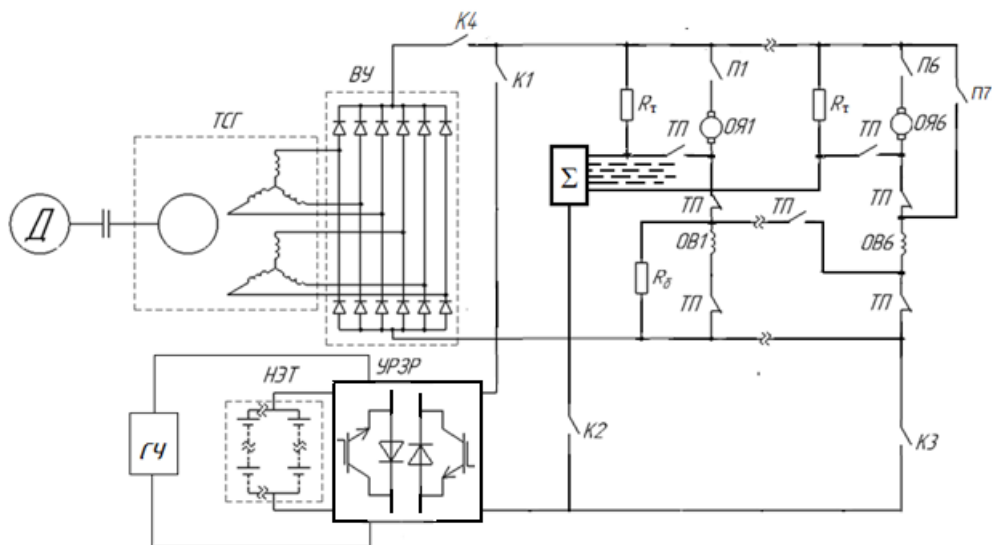


Рис. 1. Тяговая электрическая схема гибридного тепловоза с передачей переменного-постоянного тока: П1, П6 — поездные контакторы первого и шестого тяговых электродвигателей; П7 — тормозной контактор; ОВ1, ОВ6 — обмотки возбуждения первого и шестого тяговых электродвигателей; ОЯ1, ОЯ6 — обмотки якоря первого и шестого тяговых электродвигателей [выполнено авторами].

достаточно разомкнуть контактор К4 и замкнуть контакторы К1 и К3. При этом, как и в режиме торможения, дизель должен работать под нагрузкой, чтобы напряжение ТСГ было достаточным для работы мотор-вентиляторов охлаждения ТЭД.

При работе ТЭД от гибридного источника энергии возникает опасность перегрева его обмоток, поскольку увеличение тягового момента реализуется за счёт увеличения тока. Это требует оборудования ТЭД системой контроля температур обмоток. В настоящее время задача контроля текущей температуры обмоток электрических машин решена и не возникает трудностей в управлении напряжением ТСГ и блока УРЗР для ограничения тока тяговых двигателей.

Для численного решения задачи определения тяговых свойств тепловоза в условиях эксплуатации была разработана его динамическая модель. Энергетическая цепь в модели представлена гибридным источником энергии на базе тепловоза 2ТЭ116 (табл. 1). НЭТ в модели представлен блоками тяговых аккумуляторов LT-LFP70M (табл. 2).

Тепловоз 2ТЭ116 мощностью 2200 кВт имеет электрическую передачу переменного-постоянного тока с тяговыми электродвигателями ЭД-118 и является одним из наиболее распространённых грузовых тепловозов в России и странах постсоветского пространства.

Аккумуляторные батареи на транспорте применяются для пуска газотурбинных и поршневых двигателей, в промышленном транспорте, электромобилях, а также как аварийные, резервные или вспомогательные источники питания [16–23]. Сами по себе литий-ионные аккумуляторные батареи относятся к современным накопителям энергии. Блоки тяговых аккумуляторов LT-LFP70M для гибридного источника энергии тепловоза были выбраны исходя из того, что они эффективно используются для питания электродвигателей машин и бортовых систем рельсового транспорта. Кроме того, данный тип аккумуляторов уже применяется на экспериментальном гибридном тепловозе ТЭМ5Х.

Характеристики сопротивлений при движении поезда принимались на основании [25].

Моделирование движения поезда осуществлялось по обобщённому профилю III класса в соответствии с классификацией ВНИИЖТ (Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта), для которого расчётный подъём составляет $i_p = 9 \text{ ‰}$ [25]. При этом выполнялся расчёт текущей температуры обмоток якорей ТЭД в соответствии с методикой, приведённой в [24].

На первом этапе расчётов была определена весовая норма состава поезда при работе тепловоза со штатной энергетической сис-





Таблица 1

Основные параметры
тепловоза 2ТЭ116 [24]

Масса локомотива, т	276
Расчётная скорость v_p , км/ч	24,2
Расчётная сила тяги $F_{кр} \cdot 10^3$, Н	506
Сцепной вес $P_{сц}$, кН	2760
Конструкционная скорость V_k , км/ч	100

Таблица 2

Номинальные параметры ячейки
аккумуляторной батареи LT-LFP70M [8]

Ёмкость ячейки, ампер-час	73
Плотность энергии, Вт•ч/кг	130
Номинальное напряжение, В	3
Допустимый ток длительного разряда, А	146
Максимальный ток кратковременного разряда, А	219
Максимальный ток заряда, А	73
Внутреннее сопротивление, м•Ом	0,5
Ресурс аккумулятора в интервале заряда-разряда, циклы	5000
Внешние габаритные размеры, В х Ш х Т, мм	222 х 135 х 30
Масса, кг	1,8
Диапазон рабочих температур при разряде, С°	-30–+50

темой (без накопителя энергии), которая была принята как базовая величина.

Расчётный вес грузового состава Q_p определялся исходя из того, что мощность локомотива используется полностью при равномерном движении с расчётной скоростью v_p по расчётному подъёму i_p . Расчётный вес состава грузового поезда Q_p определялся по формуле, кН:

$$Q_p = \frac{F_{кр} - P_{сц} \cdot (w_0'(v_p) + i_p)}{w_0''(v_p) + i_p}, \quad (1)$$

где $w_0'(v_p)$ – основное удельное сопротивление движению локомотива в режиме тяги при расчётной скорости, Н/кН;

$w_0''(v_p)$ – основное удельное сопротивление движению грузового состава (вагонов) при расчётной скорости, Н/кН;

$F_{кр}$ – расчётная сила тяги локомотива при расчётной скорости, Н;

$P_{сц}$ – сцепной вес локомотива, кН;

i_p – крутизна расчётного подъёма, ‰.

Основное удельное сопротивление движению локомотива в режиме тяги w_0' рассчитывалось на основании [24], Н/кН:

$$w_0'(v_p) = 1,9 + 0,01 \cdot v + 0,0003 \cdot v^2, \quad (2)$$

основное удельное сопротивление движению четырёхосных вагонов на роликовых подшипниках в соответствии [24], Н/кН:

$$w_0''(v_p) = 0,7 + \frac{3 + 0,09 \cdot v + 0,002 \cdot v^2}{q_0}. \quad (3)$$

В результате получено, что расчётный вес грузового состава Q_p для принятого профиля с расчётным подъёмом 9 ‰ составил 43280 кН или 4413 т.

В программном пакете MathCad было произведено моделирование режима движения локомотива 2ТЭ116 с тяговой аккумуляторной батареей и без неё с составом.

Для численного определения тяговых характеристик тепловоза с гибридным и штатным источником энергии были выполнены сравнительные расчёты режимов движения:

1. Расчёт силы тяги и кинематических характеристик движения с составом базовой весовой нормой 4413 т.

2. Расчёт силы тяги и кинематических характеристик движения тепловоза с гибридным источником энергии с составом, вес которого превышает базовый.

3. Расчёт токов НЭТ для питания ТЭД при движении тепловоза с гибридным источником энергии и составами, вес которых превышает базовый.

4. Расчёт температур обмоток ТЭД при движении тепловоза с гибридным источником энергии и составами, вес которых превышает базовый.

Расчёт силы тяги и кинематических характеристик локомотива

Расчёт силы тяги и кинематических характеристик состава с базовой весовой нормой осуществлялся исходя из условий работы ТСГ на ТЭД.

По значению скорости тепловоза из токовых характеристик тяговых электродвигателей ЭДУ-133 с учётом значений коэффициентов ослабления возбуждения определялся ток нагрузки ТЭД.

Электромагнитный момент тягового двигателя $M_{ТЭД}$, Нм:

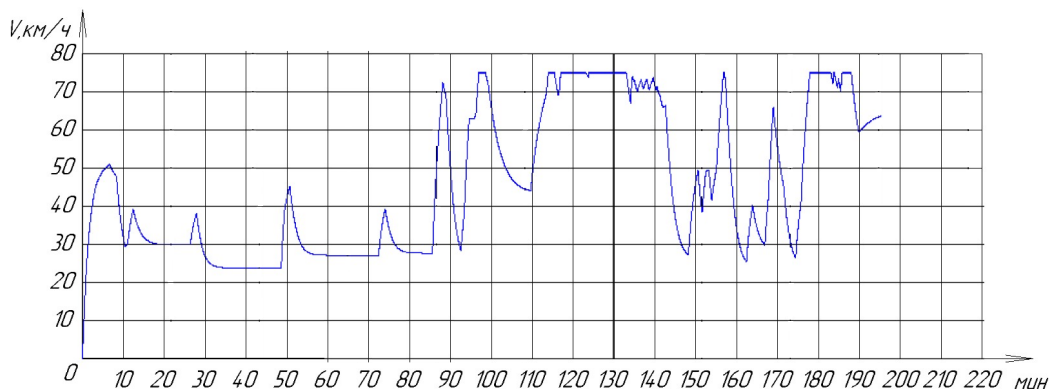


Рис. 2. Изменение скорости теплового локомотива со штатной энергетической установкой и составом расчётного веса при движении по профилю пути III класса в зависимости от времени хода $V = f(t)$ [выполнено авторами].

$$M_{\text{ТЭД}} = c_m \cdot I_a \cdot \Phi, \quad (4)$$

где c_m – постоянная тягового двигателя, определяемая по зависимости;

$$c_m = \frac{N \cdot p}{a} \cdot \frac{1}{2\pi} = c_c \cdot \frac{1}{2\pi}. \quad (5)$$

Касательный момент на колесе всего теплового локомотива M_k с учётом количества осей, Нм:

$$M_k = n_{\text{ос}} \cdot M_{\text{ТЭД}} \cdot \mu_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{тр}}, \quad (6)$$

где $n_{\text{ос}}$ – число осей теплового локомотива;

$\eta_{\text{тр}}$ – коэффициент полезного действия тягового редуктора;

$\mu_{\text{тр}}$ – передаточное отношение тягового редуктора.

Касательная сила тяги теплового локомотива F_k , Н:

$$F_k = M_k / R_k, \quad (7)$$

где R_k – радиус колеса теплового локомотива.

Ускорение поезда, м/с:

$$a(v, s) = \frac{F_k(v) - w_0'(v) - w_1'(v) - i(s)}{Q_p + P_{\text{сц}}}. \quad (8)$$

Полученная на основе математического расчёта кривая скорости теплового локомотива в программе MathCad представлена на рис. 2.

Расчёт силы тяги и кинематических характеристик гибридного локомотива

Расчёт силы тяги теплового локомотива с накопителем энергии осуществляется аналогично, за исключением расчёта тока на тяговых двигателях.

Ток на каждом двигателе гибридного теплового локомотива в режиме тяги $I_{\text{д(акб)}}$ А:

$$I_{\text{д(акб)}} = I_{\text{д}} + \frac{I_{\text{разряда}}}{n_{\text{ос}}}, \quad (9)$$

где $I_{\text{д}}$ – ток, подаваемый на ТЭД от ТСГ, А;

$I_{\text{разряда}}$ – ток разряда тяговой аккумуляторной батареи, А.

Расчёт кинематических характеристик гибридного теплового локомотива в программе MathCad представлен на рис. 3.

Ток накопителя электроэнергии определяется исходя из напряжения на элементах НЭТ.

Расчёт токов тягового накопителя электроэнергии

Напряжение в зоне экспоненциального разряда $U_{\text{бат. эксп}}$ описывается нелинейным уравнением [26], В:

$$U_{\text{бат. эксп}} = \text{Batt}A \cdot e^{-\text{Batt}B \cdot \Delta q}, \quad (10)$$

где Δq – снижение ёмкости батареи на шаге интегрирования.

Для определения параметров батареи НЭТ в соответствии с [26] были использованы эмпирические коэффициенты:

$$\text{Batt}A = 0,084 \cdot U + 0,00004, \quad (11)$$

$$\text{Batt}B = 60,693 \cdot Q_{\text{батареи}}^{-0,999}, \quad (12)$$

где U – текущее значение напряжения ячейки батареи, В;

$Q_{\text{батареи}}$ – текущее значение ёмкости аккумуляторной батареи, ампер-час.

В результате напряжение на батарее U в текущий момент времени при разряде, В:

$$U = \text{Batt}E0 + U_{\text{бат. эксп}} + U_{\text{бат. ном}} + U_{\text{бат. ном. разряд}}, \quad (13)$$

при заряде, В:

$$U = \text{Batt}E0 + U_{\text{бат. эксп}} + U_{\text{бат. ном}} + U_{\text{бат. ном. заряд}}, \quad (14)$$

где

$$\text{Batt}E0 = 1,0843 \cdot U - 0,00002, \quad (15)$$

$U_{\text{бат. ном}}$ – составляющая напряжения в зоне номинального режима работы, В;

$U_{\text{бат. ном. разряд}}$, $U_{\text{бат. ном. заряд}}$ – составляющие напряжения в зоне заряда или разряда, В.

Напряжение в зоне номинального режима работы батареи $U_{\text{бат. ном}}$ описывается уравнением, В:

$$U_{\text{бат. ном}} = \frac{-\text{Batt}K \cdot \text{Batt}Qc}{\text{Batt}Qc - \Delta q}, \quad (16)$$

где $\text{Batt}K$, $\text{Batt}Qc$ – эмпирические коэффициенты:



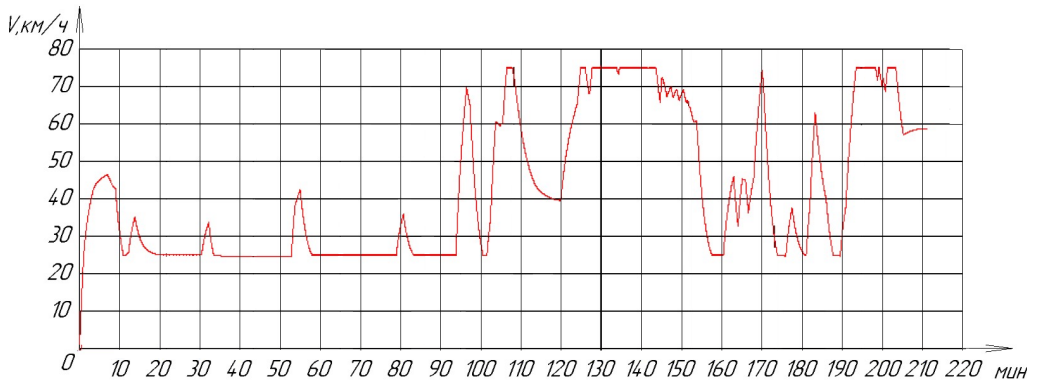


Рис. 3. Изменение скорости тепловоза с гибридной энергетической установкой при движении с составом 5750 т веса по профилю пути III класса в зависимости от времени хода $V = f(t)$ [выполнено авторами].

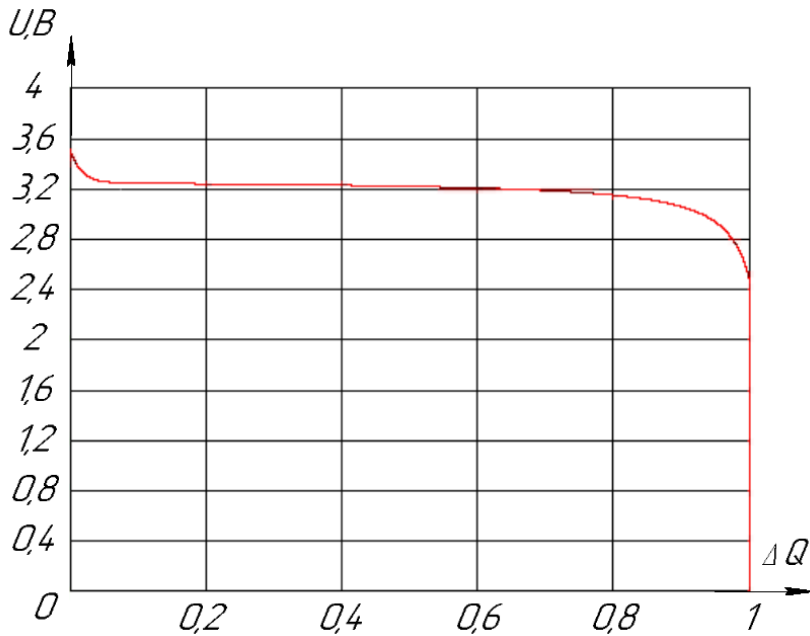


Рис. 4. Разрядная характеристика моделируемой аккумуляторной батареи $U = f(\Delta Q)$ [выполнено авторами].

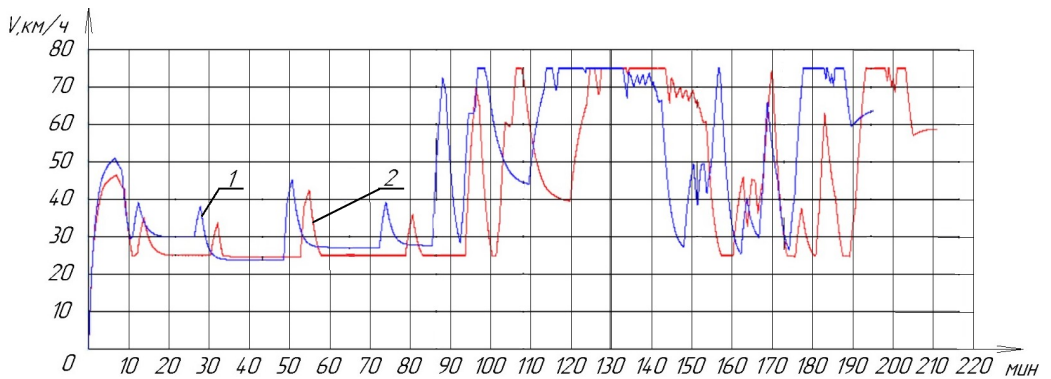


Рис. 5. Изменение скорости поезда при движении по профилю пути III класса в зависимости от времени хода $V = f(t)$: 1 – локомотив 2ТЭ116 со штатной энергетической установкой и с составом расчётной массы 4413 т; 2 – локомотив 2ТЭ116 с гибридной энергетической установкой и с составом массой 5750 т [выполнено авторами].

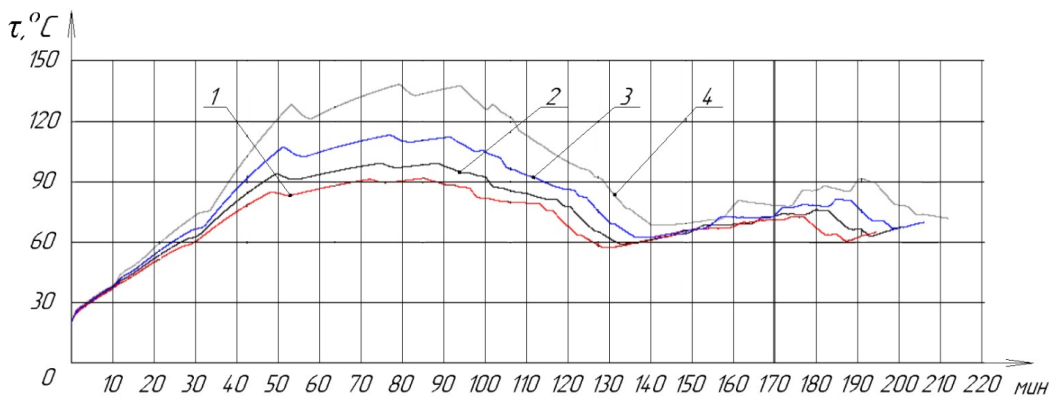


Рис. 6. Кривые превышения температуры обмотки якоря тяговых электродвигателей гибридного тепловоза при движении с составами повышенной веса: 1 – состав массой 4600 т и НЭТ с 1 ячейкой тяговой батареи; 2 – состав массой 4900 т и НЭТ с 6 ячейками тяговой батареи; 3 – состав массой 5250 т и НЭТ с 11 ячейками тяговой батареи; 4 – состав массой 5750 т и НЭТ с 18 ячейками тяговой батареи [выполнено авторами].

$$BattK = 0,006196 \cdot \frac{U}{Q_{\text{батареи}}}, \quad (17)$$

$$BattQc = 1,0341 \cdot Q_{\text{батареи}} - 0,0013. \quad (18)$$

В соответствии с [26] рассчитывались показатели напряжения на номинальном режиме при разряде $U_{\text{бат. ном. разряд}}$, В:

$$U_{\text{бат. ном. разряд}} = \frac{-BattK \cdot I_{\text{разряда}} \cdot BattQc}{BattQc - \Delta q}, \quad (19)$$

и при заряде $U_{\text{бат. ном. заряд}}$, В:

$$U_{\text{бат. ном. заряд}} = \frac{BattK \cdot I_{\text{разряда}} \cdot BattQc}{\Delta q + BattQc \cdot BattKc}, \quad (20)$$

где $BattKc = 0,1$ – постоянная аккумуляторной батареи.

Ток разряда при активной нагрузке $I_{\text{разряда}}$ вычисляется по закону Ома для участка цепи, А:

$$I_{\text{разряда}} = U/R, \quad (21)$$

где R – активное сопротивление нагрузки, к которой подключена батарея, Ом.

Полученная разрядная характеристика батареи представлена на рис. 4.

Расчёт нагрева тяговых электродвигателей

Расчёт нагрева тяговых электродвигателей выполняется в соответствии с [24] при движении в режиме тяги, °C:

$$\tau = \tau_{\infty} \cdot \frac{\Delta t}{T} + \tau_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right), \quad (22)$$

при движении в режиме холостого хода и пневматического торможения, °C:

$$\tau = \tau_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right), \quad (23)$$

где Δt – рассматриваемый интервал времени, мин;

τ_0 – начальная температура на момент расчёта;

τ_{∞}, τ_0 – тепловые постоянные для тягового электродвигателя.

Тепловые постоянные τ_{∞}, τ_0 для ТЭД в функции от тока якоря двигателя приведены в [24].

Анализ полученных результатов

Сравнение кинематических характеристик движения поездов, ведомых локомотивами со штатной и гибридной энергетическими установками, приведено на рис. 5.

Анализ работы тягового электропривода локомотива с гибридной энергетической установкой позволил рассчитать рациональные параметры тяговой батареи для повышения эксплуатационных характеристик локомотива.

Оборудование локомотива тяговой аккумуляторной батареей накладывает определённые ограничения на работу энергетического оборудования:

1. Ток от накопителя электрической энергии вызывает дополнительный нагрев тяговых электродвигателей.

2. В режимах работы НЭТ не должны допускаться режимы глубокого разряда и повышенного заряда.

3. Весовая норма поезда с гибридным локомотивом будет выше, чем для серийного локомотива; при этом требуется обеспечить заданные кинематические характеристики движения поезда, исходя из условия режимной карты, и исключить перегрев обмоток тяговых электродвигателей.



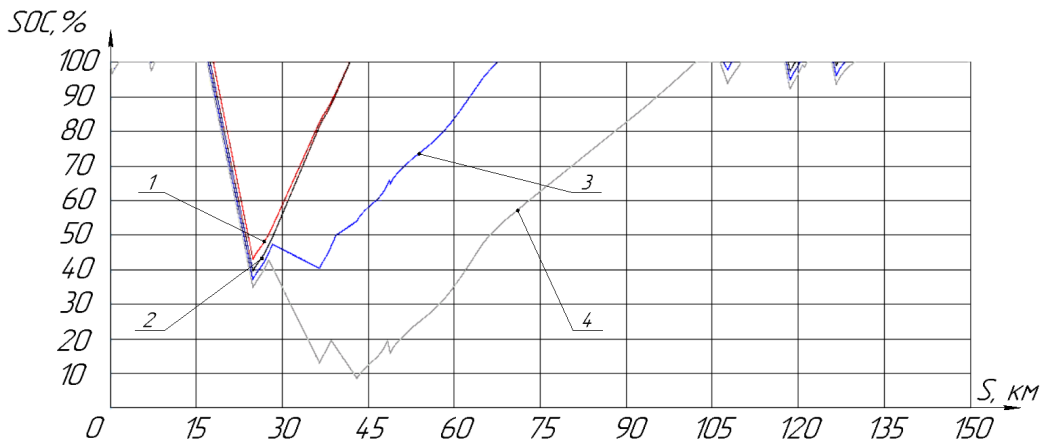


Рис. 7. Кривые разряда тяговой аккумуляторной батареи НЭТ локомотивов с гибридной энергетической установкой: 1 – состав массой 4600 т и НЭТ с 1 ячейкой тяговой батареи; 2 – состав массой 4900 т и НЭТ с 6 ячейками тяговой батареи; 3 – состав массой 5250 т и НЭТ с 11 ячейками тяговой батареи; 4 – состав массой 5750 т и НЭТ с 18 ячейками тяговой батареи [выполнено авторами].

Рациональное количество ячеек накопителя электрической энергии рассчитывается из условий нормальной эксплуатации локомотива.

На рис. 5 показано, что выбор правильного числа ячеек батареи позволяет обеспечить движение локомотива на заданном участке с расчётной скоростью ($V_p = 24,2$ км/ч) даже при весе состава, превышающем расчётный на 30 %.

На рис. 6 представлено изменение температуры обмотки якоря ТЭД при движении локомотива с гибридной энергетической установкой (при различном количестве ячеек тяговой аккумуляторной батареи). Полученные результаты позволяют установить функциональную зависимость между весом поезда и максимальной (или средней) температурой обмотки якоря на данном режиме движения.

Процесс разряда-заряда тяговой батареи НЭТ при движении локомотива имеет выраженный провал остаточной ёмкости (SOC) на расчётном подъёме (рис. 7). Степень разряда НЭТ определяется количеством ячеек и режимом работы энергетического оборудования тепловоза.

ВЫВОДЫ

Таким образом, с использованием разработанной модели определены количественные показатели эффективности использования гибридного тепловоза как тяговой единицы. На примере моделирования режимов работы тепловоза 2ТЭ116 с гибридной энергетической установкой с тяговыми аккумуляторами

типа LT-LFP70M были получены следующие выводы.

1. В результате использования на тепловозе тяговой аккумуляторной батареи масса состава поезда гарантировано может быть увеличена на 1000 т (18 %).

2. За счёт увеличения весовой нормы состава время хода поезда увеличивается на 8 % при сохранении установленного значения расчётной скорости тепловоза.

3. За счёт увеличения весовой нормы состава суммарный расход топлива тепловозом возрастает на 9 %.

4. Удельный расход топлива на единицу перевозочной работы $\text{кг}/10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$ бр уменьшается на 10 % из-за значительного повышения массы состава.

5. Превышение температуры обмотки якоря ТЭД изменяется в пределах, установленных ГОСТ-2581 (максимальная температура обмотки якоря тяговых электродвигателей составила $\tau_{max} = 130^\circ\text{C}$).

Исходя из представленных выше результатов, можно сделать общий вывод о том, что использование на локомотиве гибридной энергетической установки позволяет значительно повысить тяговые свойства тепловоза.

Сделанные выводы по своей сути универсальны, то есть могут быть применены для любых локомотивов путём подстановки числовых значений их характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов А. М., Поляшов Л. И., Иванов С. А. Гибридные энергетические установки для электробусов // Машиностроение. – 2000. – № 10. – С. 18–21.

2. Коссов Е. Е., Азаренко В. А., Бычков Д. А. и др. Разработка концепции развития автономного тягового подвижного состава. – В кн.: ВНИИЖТ – транспорту. Научные проблемы технического развития железнодорожного транспорта: Сб. науч. тр. научно-практической конференции ОАО «ВНИИЖТ» / Под. ред. А. Е. Семечкина. – М.: Интекст, 2008. – С. 89–100.
3. Tokuyama, K., Shimada, M., Terasawa, K., Kaneko, T. Practical application of a hybrid drive system for reducing environmental load. *Hitachi Review*, 2008, Vol. 57, No. 1, pp. 23–27. [Электронный ресурс]: https://www.hitachi.com/rev/pdf/2008/r2008_01_003.pdf. Доступ 17.06.2022.
4. Takahashi, H., Kato, T., Ito, T., Gunji, F. Energy storage for traction power supply systems. *Hitachi Review*, 2008, Vol. 57, No. 1, pp. 28–32. [Электронный ресурс]: https://www.hitachi.com/rev/pdf/2008/r2008_01_004.pdf. Доступ 17.06.2022.
5. Титова Т. С., Евстафьев А. М., Изварин М. Ю., Сычугов А. Н. Перспективы развития тягового подвижного состава. Ч. 1 // *Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике.* – 2018. – № 6 (79). – С. 40–44. [Электронный ресурс]: <http://rostransport.com/transportrf/download.php?src=transportrf/pdf/79/1994-831X-2018-6-40-44.pdf>. Доступ 17.06.2022.
6. Титова Т. С., Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителями энергии // *Изв. Петерб. ун-та путей сообщения.* – СПб.: ПГУПС, 2017. – № 2. – Т. 14. – С. 200–210. [Электронный ресурс]: http://izvestiapgups.org/assets/pdf/02_2017.pdf (полный текст номера). Доступ 17.06.2022.
7. Евстафьев А. М. Оценка энергоёмкости бортового накопителя энергии для тягового подвижного состава // *Бюл. результатов науч. исследований.* – 2018. – № 2. – С. 7–17. [Электронный ресурс]: <http://bmi.info/download/%D0%B2%D1%8B%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA-27.pdf> (полный текст номера). Доступ 17.06.2022.
8. Rand, D. A. J. Battery systems for electric vehicles – a state-of-the-art review. *Journal of Power Sources*, 1979, Vol. 4, Iss. 2, pp. 101–143. DOI: 10.1016/0378-7753(79)85001-6 [ограниченный доступ].
9. Pierson, J. R., Johnson, R. T. The battery Designer's challenge satisfying the ever increasing demands of vehicle electrical systems. *Journal of Power Sources*, 1991, Vol. 33, pp. 309–318. DOI: 10.1016/0378-7753(91)85069-9 [ограниченный доступ].
10. Ярославцев М. В. Определение параметров энергоустановки гибридного автомобиля моделированием процесса потребления энергии // *Электротехника.* – 2014. – № 12. – С. 17–21. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23002446&>. Доступ 17.06.2022.
11. Miller, A. R., Hess, K. S., Barnes, D. L., Erickson, T. L. System design of a large fuel cell hybrid locomotive. *Journal of Power Sources*, 2007, Vol. 173, Iss. 2, pp. 935–942. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.08.045>.
12. Cousineau, R. L. Development of a hybrid switcher locomotive the Railpower Green Goat. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2006, Vol. 9, Iss. 1, pp. 25–29. DOI: 10.1109/MIM.2006.1634954 [ограниченный доступ].
13. Letrouvé, T., Lhomme, W., Pouget, J., Bouscayrol, A. Different hybridization rate of a diesel-electric locomotive. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC*, 2014, Vol. 14. DOI: 10.1109/VPPC.2014.7007048 [ограниченный доступ].
14. Jaafar, A., Akli, C., Sareni, B., Roboam, X., Jeunesse, A. Sizing and energy management of a hybrid locomotive based on flywheel and accumulators. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, Vol. 58, No. 8, pp. 3947–3958. DOI: 10.1109/TVT.2009.2027328 [ограниченный доступ].
15. Варакин И. Н., Менухов В. В., Самитин В. В. Применение электрохимических конденсаторов ЗАО «ЭЛТОН» в составе гибридных энергосиловых установок на карьерном автотранспорте // *Горное оборудование и электромеханика.* – 2008. – № 58. – С. 106–115. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12965927>. Доступ 17.06.2022.
16. Höring, O. *Elektrische Bahnen.* Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2019, 530 p. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783111557885> [ограниченный доступ].
17. Bleijs, J. A. M., Freris, L. L., Foster, J. E., Infield, D. G., Lipman, N. H., Smith, G. A. A Wind/Diesel System with Variable Speed Flywheel. Published By: Sage Publications, Inc., *Wind Engineering*, 1993, Vol. 17, No. 3, pp. 129–146. [Электронный ресурс]: <https://www.jstor.org/stable/43749507> [ограниченный доступ].
18. Bullock, K. R. Lead/Acid Batteries. *Journal of Power Sources*, 1994, Vol. 51, Iss. 1-2, pp. 1–18. DOI: 10.1016/0378-7753(94)01952-5 [ограниченный доступ].
19. Denton, T. *Electric and Hybrid Vehicles (2nd ed.)*. Routledge, 2020, 350 p. ISBN 9780367273231. DOI: 10.1201/9780429296109 [ограниченный доступ].
20. *Electric Vehicle Application Handbook for Genesis Sealed-Lead Batteries.* Publication IBD-BR-011. Hawker Energy Products Inc. 4th ed., 1998, Vol. 2, 44 p. [Электронный ресурс]: <https://pdfslide.net/documents/electric-vehicle-application-handbook-for-genesis-electric-vehicle-application.html?page=1>. Доступ 17.06.2022.
21. Freund, H., Kaufmann, W. Batteriestützpunkte in Mittel- und Niederspannungsnetzen. In: *etz. Jg. 108, 1987, H. 17, S. 796–799.*
22. Haubrich, H.-J., Krämer, K., Dominik, H., Pesch, H. Batterien in elektrischen Netzen. Erfahrungen und Perspektiven. Contribution to conference proceedings. In: *ETG-Fachtag. Entwickl.trends in d. Energ.tech. München, 1994.*
23. Kiehne, H. A. Batteries for Electric Road Vehicles. In: *Battery Technology Handbook*, 2003, pp. 137–154.
24. Правила тяговых расчётов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с. [Электронный ресурс]: <https://djvu.online/file/syjaetzWQPjhN>. Доступ 17.06.2022.
25. Некрасов О. А., Лисицын Л. А., Мугинштейн Л. А., Рахманинов В. И. Режимы работы магистральных электровозов. – М.: Транспорт, 1983. – 231 с.
26. Mathlab Simulink Battery. Generic battery model. [Электронный ресурс]: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>. Доступ 17.06.2022. ●

Информация об авторах:

Логинова Елена Юрьевна – доктор технических наук, профессор кафедры электропоездов и локомотивов Российского университета транспорта, Москва, Россия, ey-loginova@mail.ru.

Кузнецов Григорий Юрьевич – аспирант кафедры электропоездов и локомотивов Российского университета транспорта, Москва, Россия kuznetsov_gy@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.01.2022, актуализирована 17.06.2022, одобрена после рецензирования 20.06.2022, принята к публикации 23.06.2022.

