

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.423.2:621.313.333

Г. К. ГЕТЬМАН¹, С. Л. МАРИКУЦА^{2*}

¹Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта getman-gk@i.ua, ORCID 0000-0002-3471-6096

^{2*}Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта marikutsasergei@gmail.com, ORCID 0000-0002-0429-6633

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Цель. Параметры номинального режима относятся к важнейшим эксплуатационным показателям тяговых средств, поэтому задачи выбора их оптимальных значений всегда неизбежно возникают при формировании технических требований на новый подвижной состав. В работе необходимо изложить особенности решения указанных задач для электропоездов с асинхронным тяговым приводом при двухзонном и трехзонном частотном регулировании мощности. **Методика.** Мощность номинального режима электроподвижного состава должна быть выбрана таким образом, чтобы обеспечивалась возможность реализации заданного времени хода по участку или скорости движения. Исходя из этого, а также учитывая, что к важным эксплуатационным характеристикам электропоездов относится величина ускорения в период пуска и ускорения при конструкционной скорости, сформулируем задачу определения номинальной мощности. В задаче для заданного полигона тяги необходимо найти такое значение мощности номинального режима и соответствующее ей значение силы тяги, чтобы обеспечивалась возможность осуществлять перевозки с заданным уровнем средней скорости движения при минимальных затратах электроэнергии на тягу. При этом необходимо чтобы выполнялись условия: а) скорость движения электропоезда на участке не превышает установленных ограничений; б) обеспечивается возможность реализации заданных значений ускорений. Более детальное рассмотрение вопроса показывает, что в реальных условиях, когда задано пусковое ускорение и масса поезда, задача определения мощности электропоезда практически сводится к определению оптимального значения скорости номинального режима. **Результаты.** Задача выбора оптимальных значений скорости номинального режима решается путем определения расхода электроэнергии при вариации возможных значений пусковой скорости, поэтому в расчет следует принимать только те ее значения, которые обеспечивают реализацию заданных пускового и остаточного ускорений. В работе показано, что величина силы тяги при увеличении конструкционной скорости и прочих равных условиях возрастает, если увеличивать пусковую скорость. **Научная новизна.** Авторами разработана методика для определения оптимальных значений параметров номинального режима электропоездов с асинхронным тяговым приводом, при двухзонном и трехзонном частотном регулировании мощности. **Практическая значимость.** Приведенная методика может служить основой при формировании технических требований на новый подвижной состав для железных дорог Украины.

Ключевые слова: электропоезд; пусковое и остаточное ускорение; пусковая скорость; уравнение движения; тяговая характеристика; зона регулирования мощности; удельная сила.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Введение

Параметры номинального режима относятся к важнейшим эксплуатационным показателям электроподвижного состава. Поэтому задачи определения их оптимальных значений всегда неизбежно возникают при формировании технических требований на новый подвижной состав. Для железных дорог Украины эти задачи в настоящее время являются особо актуальными в связи с необходимостью обновления морально и физически устаревшего локомотивного парка в условиях острого дефицита средств, когда особенно важно избежать приобретения малоэффективных технических средств.

Определение параметров номинального режима (силы тяги, скорости движения и мощности) тяговых средств составляет основную цель так называемых задач тягового обеспечения. Обзор работ по названной тематике приведен в [1, 5, 6]. Там же изложены пути решения таких задач применительно к грузовым и пассажирским электровозам, главным образом, с коллекторным тяговым приводом.

Цель

Применительно к электропоездам задачи определения параметров номинального режима рассматривались в меньшем объеме и только применительно к коллекторному тяговому приводу [3, 4, 9]. В настоящей статье излагаются особенности указанных задач тягового обеспечения для электропоездов с асинхронным тяговым приводом.

Методика

Мощность номинального режима должна быть выбрана таким образом, чтобы обеспечивалась возможность реализации заданного времени хода по участку (или скорости движения). При такой «размытой» постановке задачи ее решение содержит множество вариантов и при установлении правила отбора лучших в [6] предложено применять следующие показатели для сравнительной оценки вариантов:

- удельный расход электроэнергии на тягу поездов;
- избыточная мощность необходимого локомотивного парка;

– среднее значение кратности тяги, необходимое для осуществления перевозок.

Последние два показателя имеют значение для грузового и пассажирского движения, поскольку масса (составность) поездов колеблется в широких пределах.

Применительно к электропоездам применим только первый из названных показателей – расход электроэнергии поскольку в общем случае при рассредоточенной по длине поезда тяговой мощности удельная мощность, т.е. приходящаяся на 1 т массы поезда, не зависит от его составности. Для электропоездов, где тяговые двигатели расположены на конечных вагонах, в расчет должна приниматься максимальная масса поезда.

Исходя из выше изложенного и учитывая, что к важным эксплуатационным характеристикам относится величина ускорения в период пуска (разгона) a_n и ускорения при конструкционной скорости a_o (остаточное ускорение), задачу определения номинальной мощности электропоезда сформулируем так: для заданного полигона тяги необходимо найти такое значение мощности номинального режима и соответствующее ей значение силы тяги, чтобы обеспечивалась возможность осуществлять перевозки с заданным уровнем средней скорости движения при минимальных затратах электроэнергии на тягу и выполнялись условия:

- скорость движения поезда на участке не должна превышать установленных ограничений;
- необходимо обеспечить реализацию заданных значений ускорений при пуске (a_n) и остаточного (a_o).

Более детальное рассмотрение вопроса показывает, что в реальных условиях, когда задано пусковое ускорение и масса поезда, задача тягового обеспечения для электропоездов практически сводится к определению оптимального значения скорости номинального режима.

Чтобы убедиться в справедливости сказанного, выделим факторы, определяющие мощность номинального режима.

Сила тяги в Н, необходимая для реализации заданного ускорения a , определяется на основании используемого для тяговых расчетов уравнения движения поезда [2, 12] как

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$F_{\kappa}(v) = W_{\kappa}(v) + 1000m(1 + \gamma)a, \text{ Н}, \quad (1)$$

где $W_{\kappa}(v)$ – полное сопротивление движению, Н; m – масса поезда, т; $1 + \gamma$ – коэффициент инерции вращающихся частей поезда; a – ускорение, м/с².

Учитывая, что сопротивление движению поезда

$$W_{\kappa}(v) = 9,81mw_{\kappa}(v), \quad (2)$$

где $w_{\kappa}(v)$ – удельное полное сопротивление движению поезда, Н/кН.

С учетом (2) преобразуем (1) к виду

$$F_{\kappa}(v) = 9,81m[w_{\kappa}(v) + 102(1 + \gamma)a]. \quad (3)$$

При измерении скорости движения (в км/ч) мощность номинального режима определяется как

$$N_n = 0,2778 \cdot 10^{-3} F_{\kappa n} v_n, \text{ кВт}, \quad (4)$$

где индекс «н» – означает значение параметра, соответствующее номинальному режиму.

Подстановка (3) в (4) дает:

$$N_n = 2,725 \cdot 10^{-3} m[w_{\kappa}(v_n) + 102(1 + \gamma)a_n]v_n. \quad (5)$$

Выражение (5) показывает, что мощность номинального режима при заданных значениях m , a_n , $(1 + \gamma)$ и зависимости $w_{\kappa}(v)$ однозначно определяется значением скорости номинального режима, и, таким образом, задача выбора оптимальных параметров номинального режима электропоездов сводится к выбору скорости движения в режиме номинальной мощности из условия, затраты электроэнергии на тягу поездов сведутся к минимуму.

Для решения задачи можно использовать способ, предложенный в [6]. Его реализация осуществляется путем последовательного решения следующих задач:

- определение управляющих параметров уравнения движения поезда;
- оптимизация управления движением поезда по минимуму расхода электроэнергии;
- определение скорости номинального режима, соответствующей минимуму расхода электроэнергии при реализации заданного времени хода.

Для решения двух последних из поставленных выше задач можно применить подходы, используемые при решении подобных задач для пассажирских электропоездов [1, 5, 11]. Поэтому ниже остановимся только на вопросе определения управляющих параметров уравнения движения.

Тяговые расчеты базируются на интегрировании уравнения движения (6).

$$\frac{v dv}{ds} = \xi[u - w_o(v) - i(s)], \quad (6)$$

где ξ – размерный коэффициент, значение которого зависит от принятых единиц измерения физических величин; u – параметр управления; $w_o(v)$ – основное удельное сопротивление движению поезда; i – величина уклона продольного пути, являющаяся функцией пути $i(s)$.

Величина $w_o(v)$ определяется как

$$w_o(v) = \begin{cases} w'_o(v) & \text{в режиме тяги;} \\ w_{ox}(v) & \text{в режиме выбега.} \end{cases} \quad (7)$$

Зависимости $w'_o(v)$ и $w_{ox}(v)$ определяются соответствующими зависимостями, полученными на основании опытных данных [7, 8, 10].

Параметр управления зависит от режима работы электропоезда: режиму тяги соответствует $u > 0$; режиму торможения – $u < 0$; режиму выбега – $u = 0$.

Будем рассматривать тяговый привод с плавным регулированием мощности тяги. Тогда в расчет мощности принимаются параметры управления, удовлетворяющие условиям:

- режим тяги $0 \leq u \leq \overline{f_{\kappa}}(v)$;
- режим торможения $\overline{b_m}(v) \leq u \leq 0$,

где $\overline{f_{\kappa}}(v)$ и $\overline{b_m}(v)$ – предельные тяговая и тормозная характеристики соответственно, отнесенные к 1 кН веса поезда.

Рассмотрим вопрос расчета зависимостей $\overline{f_{\kappa}}(v)$ для двух наиболее часто встречающихся способов 3 зонного (рис. 1, а) и 2 зонного (рис. 1, б) частотного регулирования мощности асинхронного тягового привода электропоездов.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

В случае 3 зонного регулирования предусмотрены возможности:

– в зоне 1 ($0 \leq v \leq v_n$) – разгон с заданной пусковой силой тяги;

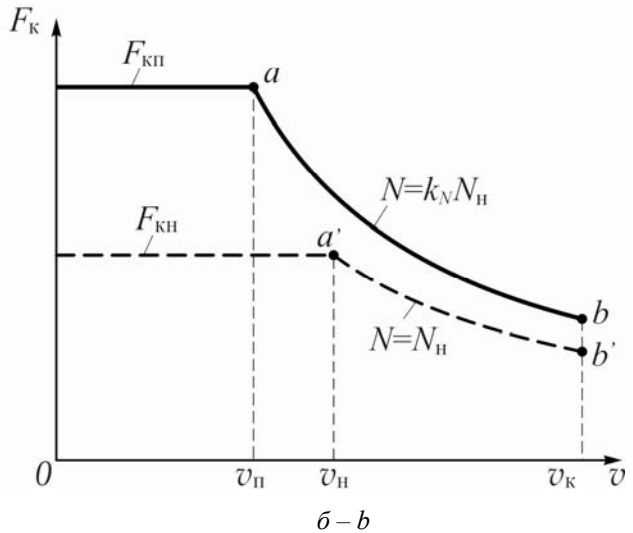
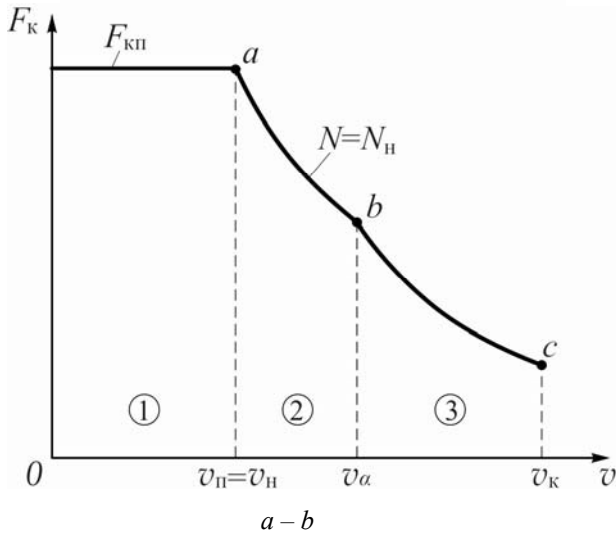


Рис. 1. Предельные тяговые характеристики электропоездов серий HRCS2 фирм:

a – «Hyundai-Rotem Company» и EJ675, *b* – «SKODA Vagonka»

– в зоне 2 ($v_n \leq v \leq v_\alpha$) – реализация постоянной мощности тяги;

– в зоне 3 ($v_\alpha \leq v \leq v_k$) – регулирование мощности тяги обратно пропорционально скорости движения.

В зоне разгона ($0 \leq v \leq v_n$) пусковая сила тяги в удельных единицах (3)

$$\overline{f_{kn}}(v) = [w_k(v_n) + 102(1 + \gamma)a_n]. \quad (8)$$

В зоне 2 ($v_n \leq v \leq v_\alpha$)

$$N_n = N_{ab} \Big|_{v=v_n}.$$

Так как $N_n = F_{kn}v_n$ и $N_{ab} = F_{k(ab)}v$, то

$$F_{k(ab)} = F_{kn} \frac{v_n}{v}, \quad (9)$$

а с учетом (8)

$$\overline{f_{k(ab)}}(v) = [w_k(v_n) + 102(1 + \gamma)a_n] \frac{v_n}{v}. \quad (10)$$

В третьей зоне регулирования ($v_\alpha \leq v \leq v_k$)

предельная мощность тяги

$$N_{bc} = N_\alpha \frac{v_\alpha}{v},$$

так как

$$N_{bc} = F_{k(bc)}v \text{ или } F_{k(bc)} = N_\alpha \frac{v_\alpha}{v^2}. \quad (11)$$

Но, поскольку $N_\alpha = F_{k\alpha}v_\alpha$, где $F_{k\alpha}$ – значение $F_{k(ab)}$ при $v = v_\alpha$, то

$$F_{k(bc)} = F_{k\alpha} \frac{v_\alpha^2}{v^2}. \quad (12)$$

Из (9) имеем:

$$F_{k\alpha} = F_{kn} \frac{v_n}{v_\alpha},$$

поэтому

$$F_{k(bc)} = F_{kn} \frac{v_n v_\alpha}{v^2}. \quad (13)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Обозначим $k_\alpha = \frac{v_\alpha}{v_\kappa}$, тогда $v_\alpha = v_\kappa k_\alpha$ и

$$F_{\kappa(bc)} = F_{\kappa n} \frac{v_n v_\kappa k_\alpha}{v^2}. \quad (14)$$

С учетом удельных величин получим:

$$\overline{f_{\kappa(bc)}}(v) = [w_\kappa(v_n) + 102(1 + \gamma)a_n] \frac{v_n v_\kappa k_\alpha}{v^2}. \quad (15)$$

Рассмотрим случай двухзонного регулирования с использованием бустерных режимов, т.е. когда предусмотрена реализация режимов нагружения, предполагается реализацию сил тяги, превышающих соответствующие номинальному режиму значения. Такой режим работы используется, например, на электропоезде Skoda. В этом случае, тяговая характеристика соответствует показанной на рис. 1, б.

Введем обозначения:

$$k_f = \frac{F_{\text{кп}}}{F_{\text{кн}}}; \quad k_N = \frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{н}}}, \quad (16)$$

где $N_{\text{п}}$ – максимальная мощность тяги при $v = v_n$.

Предельная тяговая характеристика для участка разгона определяется выражением (8), а $\overline{f_{\kappa(ab)}}(v)$ – по формуле (10).

Сила тяги номинального режима

$$F_{\text{кн}} = \frac{F_{\text{кп}}}{k_f}. \quad (17)$$

Значение скорости номинального режима получим на основании соотношения $\frac{N_n}{N_n} = \frac{F_{\text{кн}} v_n}{F_{\text{кн}} v_n}$ с учетом выражений (16):

$$v_n = \frac{k_f}{k_N} v_n. \quad (18)$$

Результаты

Задача выбора оптимальных значений скорости номинального режима v_n решается путем определения расхода электроэнергии при вариации возможных значений пусковой скоро-

сти v_n , поэтому в расчет следует принимать только те значения, которые при выбранном способе регулирования обеспечивают реализацию заданных пускового $a_{\text{п}}$ и остаточного $a_{\text{оз}}$ ускорений.

Как можно видеть из рис. 1, а и 1, б, величина силы тяги при конструкционной скорости, при прочих равных условиях, возрастает при увеличении пусковой скорости. Стало быть, чтобы исключить из расчета несоответствующие условиям решения задачи варианты, следует определить минимальные значения v_n , соответствующие заданным пусковому и остаточному ускорениям.

Сила тяги при конструкционной скорости: – с одной стороны

$$\overline{f_{\kappa}}(v_\kappa) = [w_\kappa(v_n) + 102(1 + \gamma)a_n] \frac{v_n k_\alpha}{v_\kappa};$$

– и с другой

$$\overline{f_{\kappa}}(v_\kappa) = [w_\kappa(v_\kappa) + 102(1 + \gamma)a_{\text{оз}}].$$

Пренебрегая зависимостью w_κ от v_n , получим:

$$v_n^{\text{min}} = \frac{v_\kappa [w_\kappa(v_\kappa) + 102(1 + \gamma)a_{\text{оз}}]}{k_\alpha [w_\kappa(v_n) + 102(1 + \gamma)a_n]}. \quad (19)$$

Для случая двухзонного регулирования в приведенном выражении следует принять $k_\alpha = 1$, ($v_\alpha = v_\kappa$).

В расчетах следует принимать только значения $v_n \geq v_n^{\text{min}}$. Зависимости $v_n^{\text{min}}(a_n)$ для различных значений $a_{\text{оз}}$, показаны на рис. 2.

Величина пускового ускорения при заданной массе поезда определяет тяговое усилие, а значит использование возможностей контакта «колесо-рельс» с реализацией силы тяги по сцеплению. Чтобы исключить из рассмотрения варианты, когда сила тяги не может быть надежно реализована по условиям сцепления, целесообразно установить предельно допустимые значения пускового ускорения по условиям сцепления, т.е. соответствующее заданному расчетному коэффициенту сцепления.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

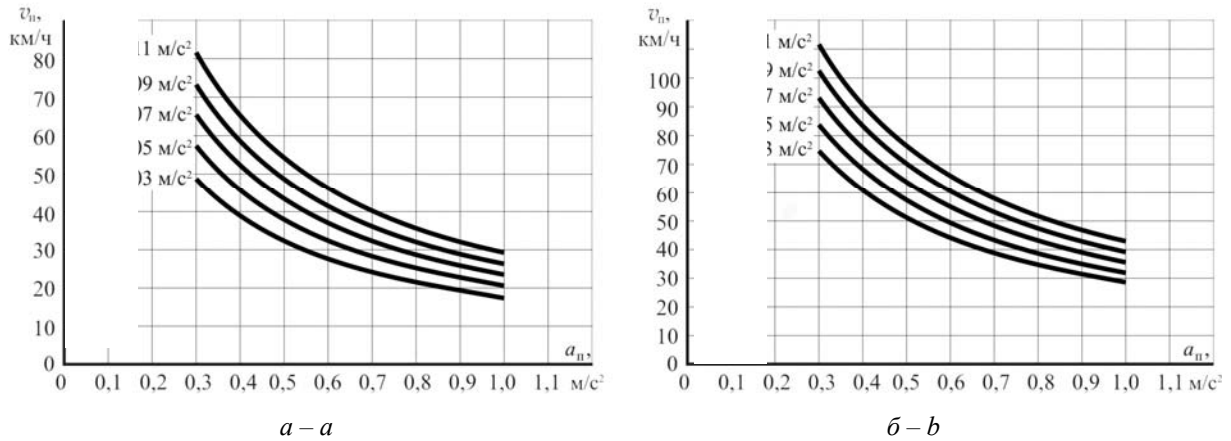


Рис. 2. Семейство зависимостей минимальной пусковой скорости от пускового ускорения при вариации значений остаточного ускорения и конструкционной скорости равной: $a - 160$ км/ч и $b - 200$ км/ч

Расчетная сила сцепления

$$F_{c\psi}(v) = 9,81 \cdot 10^3 m_c \psi_\kappa(v), \text{ Н}, \quad (20)$$

где m_c – сцепная масса (масса обмоторенных вагонов), т; $\psi_\kappa(v)$ – расчетный коэффициент сцепления.

Удельное значение силы сцепления

$$f_{c\psi}(v) = 10^3 \frac{m_c}{m} \psi_\kappa(v), \frac{\text{Н}}{\text{кН}}. \quad (21)$$

Необходимое значение ускорения получим из известного закона локомотивной тяги [2], согласно которому для надежной работы колесно-рельсового транспортного средства необходимо выполнение условия:

$$\overline{f_\kappa}(v) \leq f_{c\psi}(v).$$

На основании выражений (8) и (21) получим:

$$a_{n\psi} = \frac{10^3 \frac{m_c}{m} \psi_\kappa(v) - w_\kappa(v)}{102(1 + \gamma)}, \quad (22)$$

где $w_\kappa(v) = w_o(v)$ при условии движения электропоезда на площадке, т.е. $i = 0\%$.

Очевидно, что в расчет могут приниматься только значения $a_n \leq a_{n\psi}$.

Таблица 1

Исходные данные для расчета зависимостей минимально допустимого пускового ускорения по условиям сцепления от скорости движения $a_{n\psi}(v)$

Серия электропоезда	Масса ¹ , т		Коэффициент инерции вращающихся масс поезда $1 + \gamma$	Зависимость коэффициента сцепления от скорости $\psi_\kappa(v)$	Зависимость полного удельного сопротивления движению от скорости $w_\kappa(v)^2$
	сцепная m_c	поезда m			
HRCS2 (рассредоточенная тяга)	438	640	1,115	$\psi_\kappa(v) = 0,09 + \frac{2,6}{24 + 0,74v}$	$w_o(v) = 1,375 + 0,0178v + 0,000097v^2$

EJ675 (сосредоточенная тяга)	172	456	1,08	$\psi_{\kappa}(v) = 0,155 + \frac{4,2}{15 + 0,95v}$	$w_o(v) = 0,86 + 0,0093v + 0,00029v^2$
---------------------------------	-----	-----	------	---	--

Примечания. ¹ Значение массы приведено при максимальной загрузке вагонов пассажирами.

² Полное удельное сопротивление определяется при условии движения на площадке.

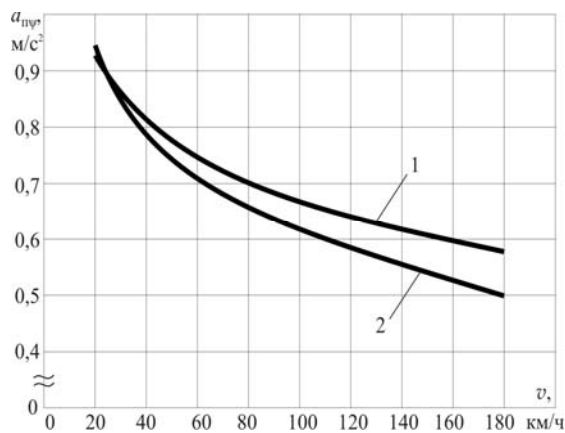


Рис. 3. Зависимости $a_{нр}(v)$ для вариантов рассредоточенной (кривая 1) и сосредоточенной (кривая 2) тяги

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна заключается в разработке методики для определения оптимальных значений параметров номинального режима электропоездов с асинхронным тяговым приводом при двух- и трехзонном частотном регулировании мощности.

Приведенная методика может служить основой при формировании технических требований на новый подвижной состав для железных дорог Украины.

Выводы

Приведенные в статье материалы обеспечивают выполнение тяговых расчетов (в части построения кривых движения) при решении задач выбора параметров номинального режима электропоездов с асинхронным тяговым приводом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Арпуль, С. В. Выбор рациональных параметров тягового электроподвижного состава / С. В. Арпуль // Электрификация транспорта. – 2014. – № 8. – С. 66–72.
2. Бабичков, А. М. Тяга поездов и тяговые расчеты : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А. М. Бабичков, П. А. Гурский, А. П. Новиков. – Москва : Транспорт, 1971. – 280 с.
3. Бещева, Н. И. Пригородное движение на электрифицированных линиях / Н. И. Бещева // Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1961. – Вып. 223. – 372 с.
4. Бещева, Н. И. Сравнение отдельных видов тяги в пригородном пассажирском движении / Н. И. Бещева // Труды ЦНИИ МПС. – Москва, 1968. – Вып. 358. – 363 с.
5. Гетьман, Г. К. Вибір раціональних параметрів номінального режиму електровозів / Г. К. Гетьман, С. Л. Марікуца // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 96–105. doi: 10.15802/stp2017/92615.
6. Гетьман, Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта : монография / Г. К. Гетьман. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с.
7. Гетьман, Г. К. Теорія електричної тяги : підручник : у 2 т. / Г. К. Гетьман. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – Т. 1. – 578 с.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

8. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
9. Розенфельд, В. Е. Электрическая тяга поездов / В. Е. Розенфельд, Ю. Е. Равкин, И. А. Лакштовский. – Москва : Гос. трансп. ж.-д. изд-во, 1940. – 799 с.
10. Fischer, Sz: Traction Energy Consumption of Electric Locomotives and Electric Multiple Units at Speed Restrictions / Sz: Fischer // Acta Technica Jauriensis. – 2015. – Vol. 8, No. 3. – P. 240–256. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n3.384.
11. Optimization of Train Operation in Multiple Interstations with Multi-Population Genetic Algorithm / Y. Huang, X. Ma, S. Su, T. Tang // Energies. – 2015. – Vol. 8 (12). – P. 14311–14329. doi: 10.3390/en81212433.
12. Sarsembayev, B. Analyze of Impact of Track Alignment on the Energy Consumption Level / B. Sarsembayev, T. Suleimenov, M. Arpabekov // Intern. J. of Traffic and Transportation Engineering. – 2015. – Vol. 4, No. 2. – P. 45–59. doi: 10.5923/j.ijtte.20150402.02.

Г. К. ГЕТЬМАН¹, С. Л. МАРИКУЦА^{2*}

¹ Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта getman-gk@i.ua, ORCID 0000-0002-3471-6096

^{2*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта marikutsasergei@gmail.com, ORCID 0000-0002-0429-6633

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ІЗ АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ

Мета. Параметри номінального режиму відносяться до найважливіших експлуатаційних показників тягових засобів, тому задачі вибору їх оптимальних значень завжди неминуче виникають при формуванні технічних вимог на новий рухомий склад. У роботі необхідно викласти особливості рішення зазначених задач для електропоїздів із асинхронним тяговим приводом при двозонному та тризонному частотному регулюванні потужності. **Методика.** Потужність номінального режиму електрорухомого складу повинна бути обрана таким чином, щоб забезпечувалася можливість реалізації заданого часу ходу по ділянці або швидкості руху. Виходячи із цього, а також враховуючи, що до важливих експлуатаційних характеристик електропоїздів відноситься величина прискорення в період пуску й прискорення при конструкційній швидкості, сформулюємо задачу визначення номінальної потужності. В задачі для заданого полігона тяги необхідно знайти таке значення потужності номінального режиму й відповідне їй значення сили тяги, щоб забезпечувалася можливість здійснювати перевезення із заданим рівнем середньої швидкості руху при мінімальній витраті електроенергії на тягу. При цьому необхідно, щоб виконувалися умови: а) швидкість руху електропоїзда на ділянці не перевищує встановлених обмежень; б) забезпечується можливість реалізації заданих значень прискорень. Більш детальний розгляд питання показує, що в реальних умовах, коли задані пускове прискорення й маса поїзда, задача визначення потужності електропоїзда практично зводиться до визначення оптимального значення швидкості номінального режиму. **Результати.** Задача вибору оптимальних значень швидкості номінального режиму вирішується шляхом визначення витрати електроенергії при варіації можливих значень пускової швидкості, тому в розрахунки слід приймати тільки ті її значення, які забезпечують реалізацію заданих пускового й залишкового прискорень. У роботі показано, що величина сили тяги при збільшенні конструкційної швидкості й інших рівних умовах зростає, якщо збільшувати пускову швидкість. **Наукова новизна.** Авторами розроблена методика для визначення оптимальних значень параметрів номінального режиму електропоїздів із асинхронним тяговим приводом, при двозонному та тризонному частотному регулюванні потужності. **Практична значимість.** Наведена методика може бути основою при формуванні технічних вимог на новий рухомий склад для залізниць України.

Ключові слова: електропоїзд; пускове й залишкове прискорення; пускова швидкість; рівняння руху; тягова характеристика; зона регулювання потужності; питома сила

H. K. HETMAN¹, S. L. MARIKUTSA^{2*}

¹Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail getman-gk@i.ua, ORCID 0000-0002-3471-6096

^{2*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail marikutsasergei@gmail.com, ORCID 0000-0002-0429-6633

SELECTION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE NOMINAL MODE ELECTRIC TRAINS WITH ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE

Purpose. Parameters of the nominal mode are related to the most important performance indicators of traction means, therefore, the problems of choosing their optimal values always inevitably arise when forming technical requirements for a new rolling stock. The paper describes the features of solving the above-mentioned problems for electric trains with an asynchronous traction drive in the case of two-zone and three-zone frequency control of power. **Methodology.** Power of nominal mode of the rolling stock should be chosen in such a way that it would be possible to realize a predetermined travel time along in the section or the movement speed. On that basis, and also taking into account the fact that the important operational characteristics of electric trains include the acceleration value during the start-up and acceleration at the design speed, we will formulate the problem of determining the nominal power. In the task for a given range of traction, it is necessary to find such a value of the nominal mode power and the corresponding force value to ensure the ability to carry out transportations with the given level of average speed with minimal energy consumption for traction. At the same time, it is necessary to fulfill the following conditions: a) the speed of the electric train on the section does not exceed the established limits; b) it is possible to realize the given values of accelerations. A more detailed consideration of the problem shows that in real conditions, when the starting acceleration and the mass of the train are given, the problem of determining electric train power is practically reduced to determining the optimal value of the nominal mode speed. **Findings.** The task of choosing the optimal values of the nominal mode speed is solved by determining the electric power consumption with the variation of the possible values of starting speed. Therefore, only those values that ensure the implementation of the given starting and residual accelerations should be taken into account. The work shows that the traction force value increases with the design speed increase and other equal conditions, if the starting speed is increased. **Originality.** Authors developed the methodology for determining the optimal values of the nominal mode parameters of electric trains with an asynchronous traction drive, with two-zone and three-zone frequency power regulation. **Practical value.** The above mentioned methodology can be the basis when forming technical requirements for new rolling stock for Ukraine's railways.

Keywords: electric train; starting and residual acceleration; starting speed; motion equation; traction characteristic; power regulation zone; specific force

REFERENCES

1. Arpul, S. V. (2014). The choice of rational parameters of the traction electric rolling stock. *Electrification of Transport*, 8, 66-72.
2. Babichkov, A. M., Gurskiy, P. A., & Novikov, A. P. (1971). *Tyaga poezdov i tyagovyye raschety*. Moscow: Transport.
3. Beshcheva, N. I. (1961). *Prigorodnoye dvizheniye na elektrifitsirovannykh liniyakh*. Moscow: Railway research institution of railway transport.
4. Beshcheva, N. I. (1968). *Sravneniye otdelnykh vidov tyagi v prigorodnom passazhirskom dvizhenii*. Moscow: Transport.
5. Hetman, H. K., & Marikutsa, S. L. (2017). Selection of rational parameters of the nominal mode of electric locomotives. *Science and Transport Progress*, 1(67), 96-105. doi: 10.15802/stp2017/92615
6. Hetman, H. K. (2008). *Nauchnyye osnovy opredeleniya ratsionalnogo moshchnostnogo ryada tyagovykh sredstv zheleznodorozhnogo transporta [Monograph]*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

7. Hetman, H. K. (2014). *Teoriia elektrychnoi tiahuy* (Vol. 1). Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
8. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty*. (1985). Moscow: Transport.
9. Rozenfeld, V. Y., Ravkin, Y. Y., & Lakshtovskiy, I. A. (1940). *Elektricheskaya tyaga poyezdov*. Moscow: Transzheldorizdat.
10. Fischer, S. (2015). Traction Energy Consumption of Electric Locomotives and Electric Multiple Units at Speed Restrictions. *Acta Technica Jauriensis*, 8(3), 240-256. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n3.384
11. Huang, Y., Ma, X., Su, S., & Tang, T. (2015). Optimization of Train Operation in Multiple Interstations with Multi-Population Genetic Algorithm. *Energies*, 8(12), 14311-14329. doi: 10.3390/en81212433
12. Sarsembayev, B., Suleimenov, T., & Arpabekov, M. (2015). Analyze of Impact of Track Alignment on the Energy Consumption Level. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4(2), 45-59. doi: 10.5923/j.ijtte.20150402.02

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. М. Афанасовым (Украина); д.т.н., проф. О. А. Бейгулом (Украина)

Поступила в редколлегию: 10.02.2017

Принята к печати: 17.05.2017