

УДК 629.42

**В. А. Мнацаканов****ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**

Дата поступления: 10.10.2017

Решение о публикации: 13.11.2017

**Аннотация**

**Цель:** Вывести в простом и понятном виде основной закон электрической тяги, который прямо связывает удельную электрическую мощность тяговой сети и развиваемую тяговым приводом электроподвижного состава удельную пусковую мощность тяги с основными параметрами его движения – скоростью и ускорением. **Методы:** Применен предложенный Эйнштейном метод «идеализированного эксперимента», дополненный введенным автором условием ограниченности мощности тяговой сети. На основе этих допущений получены закон полного поля для разгона электроподвижного состава с постоянным ускорением и закон ослабленного поля для его разгона в условиях постоянной мощности тяги. **Результаты:** Установлены аналитические зависимости, представляющие собой уравнения проектирования электрической тяги. Впервые выведены три следствия из закона ослабленного поля, которые показывают, как меняются время разгона и пройденный электроподвижным составом при разгоне путь при варьировании зонами регулирования тяги: зоной работы с постоянным ускорением и зоной работы с постоянной мощностью. Выводы, сделанные на основе указанных следствий, подтверждены примерами расчетов и результатами испытаний вагонов метрополитена. Показано, что результаты теоретических расчетов по уравнениям проектирования совпадают с результатами испытаний с точностью 5–7%. Отмечается, что в ряде случаев сравнительные теоретические расчеты по уравнениям проектирования могут дать более высокую точность, чем результаты испытаний, поскольку погрешность приборов может превысить погрешность теоретических расчетов, выполненных с вышеуказанными допущениями. **Практическая значимость:** Полученные уравнения проектирования целесообразно ввести в электрическую тягу, поскольку с их помощью можно теоретически исследовать вопросы проектирования и выбора параметров электрической тяги. Они помогут читателю глубоко проникнуть в электрическую тягу, в ее законы и следствия из них и ощутить радость творчества в этой сфере человеческих знаний, как однажды ощутил ее сам автор.

**Ключевые слова:** Электрическая тяга, идеализированный эксперимент, законы, уравнения проектирования.

**Valeriy A. Mnatsakanov**, Cand. Sci. Eng., director general, associate fellow at Russian Academy of Engineering, kamotltd@gmail.com (ООО «ТОМАК LTD») THE LAWS OF ELECTRIC TRACTION

**Summary**

**Objective:** To derive the fundamental law of electric traction in a simple and clear form, which connects directly the specific electric power of electric traction network and the specific starting power of traction, developed by an electric stock towline, with the basic parameters of movement of an electric stock – speed and acceleration. **Methods:** Einstein’s method of “idealized experiment” was applied, complemented with a condition of electric traction boundedness of the network, introduced by the author. On the basis of the assumptions in question, the law of total field for electric stock speedup with constant acceleration and the law of weak field for its speedup in conditions of constant traction power were obtained. **Results:** Analytical dependencies were established representing the equations of electric traction projection. Three corollaries were first derived from the law of weak field, showing the way acceleration time and the speedup distance of an electric stock were changing under the diversity of traction control

zones: the zone of operation with constant acceleration, the zone of operation with constant power. The conclusions made on the basis of the given corollaries were verified by the examples of calculations and transit vehicles testing results. It was shown, that the results of theoretical calculations which follow from projection equations were 5–7% in agreement with testing results. It should be noted, that in some cases the comparative theoretical calculations, derived from equations of design, may present higher accuracy than testing results, as the number of errors in theoretical equations, performed with the assumptions stated above, may be exceeded by the number of instrument errors. **Practical importance:** It is advisable to introduce the obtained equations of design in electric traction, as the latter make it possible to study the issues of design and selection of electric traction parameters in theory. The equations will help the reader to obtain an understanding of electric traction, its laws and corollaries and feel the joy of creation in this sphere of human knowledge, as it once did the author of the study.

**Keywords:** Electric traction, idealized experiment, laws, equations of design.

Электрическая тяга – наука о превращении электроподвижным составом электрической энергии в механическую работу [1]. Тяговый привод развивает заданную мощность и создает тягу, обеспечивает ускорение и повышает скорость электроподвижного состава. Соотношения между электрической мощностью, скоростью и ускорением определяют параметры основных режимов работы электрической тяги.

Электрическая тяга получает питание от контактной сети, одним из главных свойств которой является ограниченность мощности ( $P_c = \text{const}$ ) [2]. Из этой предпосылки можно вывести основные законы электрической тяги.

### Закон полного поля

Рассмотрим разгон вагона метрополитена, оснащенного тяговыми двигателями постоянного тока и системой их безреостатного пуска, на прямом горизонтальном пути от начала движения до выхода тяговых двигателей на естественную характеристику полного возбуждения.

Следуя классической физике, рассмотрим «идеализированный эксперимент», в котором отсутствует сопротивление движению. «Идеализированный эксперимент никогда не может быть осуществлен, так как невозможно исключить все внешние влияния. Но он ука-

зывает путь, на котором были установлены основы механики движения» [3, с. 364].

При отсутствии сопротивления движению, которое в этом режиме составляет около 5% от силы тяги, для пуска вагона с постоянным пусковым ускорением имеем следующие соотношения:

$$P_{\text{п}} \cdot \eta_3 = F_{\text{п}} \cdot V_{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{п}}$  – пусковая мощность на валу тяговых двигателей, Вт,  $P_{\text{п}} = P_c - \Delta P$ ;  $P_c$  – мощность, потребляемая тяговым приводом из сети, Вт;  $\Delta P$  – потери мощности в тяговом приводе, Вт;  $\eta_3$  – КПД зубчатой передачи,  $\eta_3 \approx 0,97$ ;  $V_{\text{п}}$  – пусковая скорость при полном возбуждении (при максимальной мощности) тяговых двигателей, м/с;  $F_{\text{п}}$  – сила тяги на ободе колеса в режиме пуска, Н:

$$F_{\text{п}} = m_{\text{в}} (1 + \gamma) a_{\text{п}}, \quad (2)$$

здесь  $m_{\text{в}}$  – инерционная масса вагона, кг;  $(1 + \gamma)$  – коэффициент инерции вращающихся масс,  $(1 + \gamma) \approx 1,07$ ;  $a_{\text{п}}$  – пусковое ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Формула (2) без  $(1 + \gamma)$  представляет собой известный закон движения Ньютона. В статье «К 200-летию со дня смерти Исаака Ньютона», написанной в 1927 г., Эйнштейн назвал эту формулу «фундаментом всей механики и, пожалуй, всей физики». На ее основе выведем основные формулы электрической тяги.

Подставив (2) в (1), имеем

$$P_{\text{п}} \eta_3 = m_{\text{в}} (1 + \gamma) a_{\text{п}} V_{\text{п}}. \quad (3)$$

После преобразований получим формулу, представляющую собой **Основной закон электрической тяги**, поскольку он прямо связывает удельную пусковую мощность тяги с основными параметрами движения – скоростью и ускорением электроподвижного состава:

$$p_{\text{п}} \eta_3 = a_{\text{п}} V_{\text{п}}, \quad (4)$$

где  $p_{\text{п}}$  – удельная пусковая мощность тяги, кВт/т, определяемая как

$$p_{\text{п}} = \frac{P_{\text{с}} - \Delta P}{m_{\text{в}}(1 + \gamma)} = \frac{P_{\text{п}}}{m_{\text{в}}(1 + \gamma)}. \quad (5)$$

Для времени разгона с постоянным ускорением имеем

$$t_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{a_{\text{п}}}. \quad (6)$$

Подставив в соотношение (6) формулу (4), получим уравнение, представляющее собой **Закон полного поля**:

$$t_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}^2}{p_{\text{п}} \eta_3}. \quad (7)$$

**Закон полного поля:** при ограниченной мощности источника питания и разгоне вагона с постоянным ускорением время достижения им скорости выхода тяговых двигателей на полную мощность (на характеристику полного поля) прямо пропорционально квадрату этой скорости.

Для пути при разгоне с постоянным ускорением справедливо:  $S = \frac{at^2}{2}$ .

Подставив сюда (4) и (7), получим

$$S_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}^3}{2p_{\text{п}} \eta_3}, \quad (8)$$

где  $S_{\text{п}}$  – путь при разгоне с постоянным ускорением до скорости  $V_{\text{п}}$ , м.

**Пример 1.** Разгон вагона метро, оснащенного тяговыми двигателями постоянного тока типа ДК-117, до скорости их выхода на естественную характеристику полного возбуждения ( $V_{\text{п}}$ ). Удельная пусковая мощность тягового привода вагона в этом режиме с достаточной точностью может быть определена по формуле

$$p_{\text{п}} = \frac{[mU_{\text{с}} - n_{\text{дв}} r_{\text{дв}} I_{\text{я}}] I_{\text{я}}}{m_{\text{в}}(1 + \gamma)}, \quad (9)$$

где  $m$  – число параллельных групп тяговых двигателей,  $m = 2$ ;  $U_{\text{с}}$  – напряжение контактной сети, В;  $n_{\text{дв}}$  – число тяговых двигателей на вагоне,  $n_{\text{дв}} = 4$ ;  $r_{\text{дв}}$  – сопротивление обмоток тягового двигателя,  $r_{\text{дв}} \approx 0,1$  Ом;  $I_{\text{я}}$  – ток якоря, А;  $m_{\text{в}}$  – масса вагона с максимальной нагрузкой,  $m_{\text{в}} = 57$  т.

При напряжении  $U_{\text{с}} = 850$  В и токе якоря  $I_{\text{я}} = 440$  А

$$p_{\text{п}} = \frac{[2 \cdot 850 - 4 \cdot 0,1 \cdot 440] \cdot 440}{57 \cdot 1,07} = 11 \text{ кВт/т.}$$

При  $V_{\text{п}} = 30$  км/ч (8,33 м/с) и  $\eta_3 = 0,97$  получим

$$t_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}^2}{p_{\text{п}} \eta_3} = \frac{8,33^2}{11 \cdot 0,97} = 6,5 \text{ с,}$$

$$S_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}^3}{2p_{\text{п}} \eta_3} = \frac{8,33^3}{2 \cdot 11 \cdot 0,97} = 27,1 \text{ м,}$$

$$a_{\text{п}} = \frac{p_{\text{п}} \eta_3}{V_{\text{п}}} = \frac{11 \cdot 0,97}{8,33} = 1,28 \text{ м/с}^2.$$

Ценность формул для  $t_{\text{п}}$ ,  $S_{\text{п}}$  и  $a_{\text{п}}$  состоит в том, что они действительны для любого типа тягового электропривода. По ним легко анализировать, как влияют тяговые параметры вагона ( $p_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{п}}$ ) на параметры разгона ( $a_{\text{п}}$ ,  $t_{\text{п}}$ ,  $S_{\text{п}}$ ).

Если для расчета  $P_{\text{п}}$  затруднительно определить потери мощности в тяговом приводе

( $\Delta P$ ), то в первом приближении можно воспользоваться формулой с КПД:

$$P_{\text{п}} = P_{\text{с}} \eta_{\text{тп}},$$

где  $\eta_{\text{тп}} = 0,85-0,9$  – КПД привода с тяговыми двигателями постоянного тока;  $\eta_{\text{тп}} = 0,8-0,85$  – КПД привода с тяговыми двигателями переменного тока.

Опытные данные показывают, что левая и правая части формулы (4) не равны друг другу. Расхождение между ними составляет ту удельную мощность тяги, которая идет на преодоление сопротивления движению. Таким образом, для каждого момента разгона можно опытным путем с достаточной точностью, по разнице левой и правой частей формулы (4), устанавливать величину сопротивления движению. Это открывает новые возможности для измерения величины сопротивления движению при езде «под током».

### Закон ослабленного поля

Процесс разгона вагона в период, когда его тяговый привод развивает постоянную мощность, описывается уравнением

$$t = \int_0^v \frac{dv_i}{a_i}, \quad (10)$$

где  $t$  – время разгона, с;  $v$  – скорость, м/с;  $a_i$  – текущее значение ускорения, м/с<sup>2</sup>.

Как следует из (4),

$$a_i = \frac{p_{\text{п}} \eta_3}{v_i}. \quad (4')$$

Подставив (4') в (10) и проинтегрировав, получим

$$t = \int_0^v \frac{v_i dv_i}{p_{\text{п}} \eta_3} = \frac{V^2}{2 p_{\text{п}} \eta_3}. \quad (11)$$

С учетом (11) найдем, что время ( $\Delta t$ ) разгона от скорости  $V_1$  до скорости  $V_2$  при постоянной мощности тягового привода составит

$$\Delta t = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 p_{\text{п}} \eta_3}. \quad (12)$$

Суммарное время ( $t_{\text{оп}}$ ) разгона до скорости  $V_{\text{оп}}$  при постоянном ускорении в диапазоне скоростей  $0 - V_{\text{п}}$  и при постоянной мощности привода в диапазоне скоростей  $V_{\text{п}} - V_{\text{оп}}$  можно рассчитать по формуле, представляющей собой **Закон ослабленного поля**:

$$t_{\text{оп}} = t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{оп}} = \frac{V_{\text{п}}^2}{p_{\text{п}} \eta_3} + \frac{V_{\text{оп}}^2 - V_{\text{п}}^2}{2 p_{\text{п}} \eta_3} = \frac{V_{\text{п}}^2 + V_{\text{оп}}^2}{2 p_{\text{п}} \eta_3}, \quad (13)$$

где  $t_{\text{п}}$  – время разгона с постоянным ускорением, с;  $\Delta t_{\text{оп}}$  – время разгона с постоянной мощностью, с.

**Закон ослабленного поля:** при разгоне с постоянным ускорением до скорости полного возбуждения, а затем с постоянной мощностью до скорости ослабленного возбуждения время достижения скорости ослабленного возбуждения прямо пропорционально полусумме квадратов скоростей полного и ослабленного возбуждения.

Основываясь на (13), можно рассчитать разницу во времени разгона до скорости  $V_{\text{оп}}$  в следующих случаях:

- 1)  $V_{\text{п}} < V_{\text{оп}}$  (вариант с регулированием возбуждения) –  $t_{\text{оп1}}$ ;
- 2)  $V_{\text{п}} = V_{\text{оп}}$  (вариант без регулирования возбуждения) –  $t_{\text{п2}}$ .

Время разгона во втором случае будет больше, чем в первом, на величину  $\Delta t$ :

$$\Delta t = t_{\text{п2}} - t_{\text{оп1}} = \frac{V_{\text{оп}}^2}{p_{\text{п}} \eta_3} - \frac{V_{\text{п}}^2 + V_{\text{оп}}^2}{2 p_{\text{п}} \eta_3} = \frac{V_{\text{оп}}^2 - V_{\text{п}}^2}{2 p_{\text{п}} \eta_3}. \quad (14)$$

Законы, если они таковыми являются, должны позволять формулировать следствия, вытекающие из них и дающие новые знания [3].

Сравнение (14) и (12) позволяет сформулировать **Первое следствие** из закона ослабленного поля:

при питании от источника ограниченной мощности проигрыш во времени разгона до заданной скорости при разгоне без регулирования возбуждения по сравнению с вариантом, имеющим зону регулирования возбуждения, равен времени движения при регулировании возбуждения.

Путь, пройденный вагоном при разгоне до скорости  $V_{\text{он}}$ , составит

$$S_{\text{он}} = S_{\text{п}} + \Delta S_{\text{он}} = \frac{V_{\text{п}}^3 + 2V_{\text{он}}^3}{6\rho_{\text{п}}\eta_3}, \quad (15)$$

где  $S_{\text{п}}$  – путь разгона до скорости  $V_{\text{п}}$  с постоянным ускорением, м;  $\Delta S_{\text{он}}$  – путь разгона от  $V_{\text{п}}$  до  $V_{\text{он}}$  с постоянной мощностью, м.

По аналогии с **Первым** можно сформулировать **Второе следствие** из закона ослабленного поля:

при питании от источника ограниченной мощности путь, пройденный при разгоне до заданной скорости без регулирования возбуждения тяговых двигателей, будет больше пути, пройденного при разгоне с регулированием возбуждения, на величину, равную половине пути, пройденному в режиме регулирования возбуждения.

Из анализа уравнений полного и ослабленного поля вытекает **Третье следствие**:

при питании от источника ограниченной мощности отказ на проектируемом электроподвижном составе от регулирования возбуждения тяговых двигателей (отказ от использования зоны регулирования постоянной мощности) ведет к проигрышу по времени и пути разгона и, как следствие, к перерасходу электроэнергии на тягу при движении на заданном перегоне с заданной скоростью сообщения.

### Пример 2.

1. При разгоне вагона до скорости  $V_{\text{он}}$  с регулированием возбуждения ( $\rho_{\text{п}} = 11$  кВт/т,  $V_{\text{п}} = 30$  км/ч и  $V_{\text{он}} = 60$  км/ч) время разгона и путь составят

$$t_{\text{он}} = \frac{V_{\text{п}}^2 + V_{\text{он}}^2}{2\rho_{\text{п}}\eta_3} = \frac{8,33^2 + 16,67^2}{2 \cdot 11 \cdot 0,97} = 16,27 \text{ с,}$$

$$S_{\text{он}} = \frac{V_{\text{п}}^3 + 2V_{\text{он}}^3}{6\rho_{\text{п}}\eta_3} = \frac{8,33^3 + 2 \cdot 16,67^3}{6 \cdot 11 \cdot 0,97} = 153,7 \text{ м.}$$

2. При разгоне вагона до скорости  $V_{\text{он}}$  с постоянным ускорением и без регулирования возбуждения ( $\rho_{\text{п}} = 11$  кВт/т,  $V_{\text{п}} = V_{\text{он}} = 60$  км/ч) время разгона и путь составят

$$t_{\text{он}} = \frac{V_{\text{он}}^2}{\rho_{\text{п}}\eta_3} = \frac{16,67^2}{11 \cdot 0,97} = 26,04 \text{ с,}$$

$$S_{\text{он}} = \frac{V_{\text{он}}^3}{2\rho_{\text{п}}\eta_3} = \frac{16,67^3}{2 \cdot 11 \cdot 0,97} = 217 \text{ м.}$$

Время разгона во втором случае больше, чем в первом, на 9,77 с ( $26,04 - 16,27 = 9,77$  с). Эта разница равна времени движения вагона при регулировании возбуждения ( $16,27 - 6,5 = 9,77$  с). Об этом говорит **Первое следствие** из закона ослабленного поля.

Путь (217 м), пройденный вагоном во втором случае (без регулирования возбуждения), больше, чем путь, пройденный им в первом случае (при регулировании возбуждения) (153,7 м) на 63,3 м. Эта величина (63,3 м) равна половине пути 126,6 м ( $153,7 - 27,1 = 126,6$  м), пройденному вагоном в первом случае, за время регулирования возбуждения. Об этом говорит **Второе следствие** из закона ослабленного поля:

$$\Delta S_{\text{он}} = \frac{V_{\text{он}}^3 - V_{\text{п}}^3}{3\rho_{\text{п}}\eta_3} = \frac{16,67^3 - 8,33^3}{3 \cdot 11 \cdot 0,97} = 126,6 \text{ м.}$$

Приведенные формулы дают вполне приемлемую точность при сравнительных расчетах, когда делается, например, выбор между двумя группами тяговых двигателей, которые предполагается установить на вагон и которые не намного отличаются друг от друга значениями  $V_{\text{п}}$ . В этом случае не учитывается влияние сопротивления движению примерно одинаково отражается на результатах расчетов в каждом из вариантов. Это обеспечивает точность сравнительных расчетов по времени, пути и расходу электроэнергии.

Следует отметить, что аналогичные формулы могут быть выведены для режима электрического торможения электроподвижного состава.

Представим результаты, полученные при испытаниях вагонов метро и определенные по формулам (7), (8), (13), (15):

	$t_n, c$	$S_n, м$	$t_{оп}, c$	$S_{оп}, м$
Расчет.....	8,6	38	30	376
Опыт .....	8,8	40	32,2	400

Расчетные и опытные данные были получены при  $p_n = 9,13$  кВт/т,  $V_n = 31,5$  км/ч,  $V_{оп} = 76,7$  км/ч.

Как видно, результаты расчетов и опытные данные совпали с точностью 5–7%, что вполне приемлемо для практических целей.

Также эффективно теоретические формулы могут быть применены, когда требуется оценить, насколько изменится время разгона и путь при увеличении или уменьшении  $V_n$ , т. е. при варьировании диапазонами регулирования постоянной силы тяги и постоянной мощности.

В ряде случаев сравнительные теоретические расчеты могут дать даже более высокую точность, чем результаты испытаний, поскольку погрешность приборов при реальных измерениях может превысить погрешность теоретических расчетов, не учитывающих только разницу в сопротивлениях движению сравниваемых объектов, которая может быть незначительной.

Способ исключения влияния сопротивления движению на результаты сравнительных расчетов может быть использован для оценки величин погрешности измерений при проведении особо точных экспериментальных исследований, а также для проверки измерительной аппаратуры перед началом тягово-энергетических испытаний. Это формирует новый подход к использованию теории и эксперимента, например, при проектировании электрической тяги для особо ответственных установок.

Уравнения движения электропоезда, используемые в электрической тяге [4–12], представляют собой математические форму-

лы, описывающие и объясняющие эмпирический материал, накопленный при многократном наблюдении перемещений реально существовавших объектов. Они сложны, требуют вычислений удельных равнодействующих сил и их составляющих. Значения и воздействие этих сил трудно себе физически представить. Поэтому с их помощью сложно проектировать тягу даже при наличии компьютеров.

Уравнения (4), (7), (8), (13), (15) можно назвать **уравнениями проектирования**. Они позволяют сопровождать процесс «мысленного проектирования» и «мысленного перемещения». Их идеализированный объект нельзя реально увидеть, а можно лишь его себе представить. Например, в виде некоторой абстрактной электротяговой установки с непрерывно меняющимися параметрами, такими, как ее инерционная масса, удельная пусковая мощность, характеристики ее тяговых двигателей, скорость их выхода на характеристику полного возбуждения и др.

Почему следует ввести уравнения проектирования в электрическую тягу? Потому, что с их помощью легко и просто теоретически исследовать вопросы проектирования и выбора параметров электротяговых устройств. И делать это более наглядно и основательно, чем без них.

Автор надеется, что уравнения проектирования помогут заинтересованному читателю глубоко проникнуть в электрическую тягу, осознать уровень своей подготовки и поверить в свои силы. А затем быстро перейти к творчеству в этой сфере человеческих знаний и ощутить радость самого творчества, как однажды ощутил ее сам автор.

### Библиографический список

1. Мнацаканов В. А. Основания электрической тяги / В. А. Мнацаканов // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – 2007. – Вып. 2 (11). – С. 194–199.
2. Мнацаканов В. А. К теории тяговых параметров вагонов метрополитена / В. А. Мнацаканов. –

Труды ВНИИ вагоностроения. – 1975. – Вып. 26. – С. 89–103.

3. Эйнштейн А. Собр. науч. трудов : в 4 т. / А. Эйнштейн ; пер. и под ред. И. Е. Тамма и др. – М. : Наука, 1967. – Т. 4. – 599 с. (см. с. 357–543).

4. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М. : Транспорт, 1983. – 328 с.

5. Фергусон Т. Основы проектирования электрической тяги / Т. Фергусон ; пер. с англ. Л. В. Гуткина [и др.] ; под ред. А. П. Михеева. – М. : Трансжелдориздат, 1957. – 407 с.

6. Шевалин В. А. Выбор тягового электродвигателя / В. А. Шевалин. – М. : Трансжелдориздат, 1934. – 126 с.

7. Хвостов В. С. Теория тягового двигателя электровоза / В. С. Хвостов // Труды МИИТ. – 1962. – Вып. 156. – С. 4–136.

8. Гаврилов Я. И. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями / Я. И. Гаврилов, В. А. Мнацаканов. – М. : Транспорт, 1986. – 230 с.

9. Лебедев А. Б. Основы электрической тяги / А. Б. Лебедев. – Л. : ОНТИ, 1937. – 620 с.

10. Мнацаканов В. А. Форсажный тяговый привод / В. А. Мнацаканов // Железнодорожный транспорт. – 2006. – № 2. – С. 50–54.

11. Шевалин В. А. Тяговые расчеты электрических железных дорог и трамваев / В. А. Шевалин. – Л. : Кубуч, 1931. – 336 с.

12. Осипов С. И. Теория электрической тяги / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов. – М. : Маршрут, 2006. – 435 с.

## References

1. Mnatsakanov V. A. Osnovaniya elektrycheskoy tyagy [Foundations of electric traction]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2007, issue 2 (11), pp. 194–199. (In Russian)

2. Mnatsakanov V. A. K teorii tyagovykh parametrov vagonov metropolityena [On the theory of traction parameters of transit vehicles]. *Trudy VNIИ вагоно-*

*stroyeniya* [Proceedings of All-Russian research institute of car building], 1975, issue 26, pp. 89–103. (In Russian)

3. Einstein A. *Sobraniye nauchnykh trudov* [Collected papers]. In 4 vol. Tr. and red. by I. E. Tamm et al. Moscow, Nauka Publ., 1967, vol. 4, 599 p. (see pp. 357–543). (In Russian)

4. Rosenfeld V. Y., Isayev I. P. & Sydorov N. N. *Teoriya elektrycheskoy tyagy* [The theory of electric traction]. Moscow, Transport Publ., 1983, 328 p. (In Russian)

5. Ferguson T. *Osnovy proyektirovaniya elektrycheskoy tyagy* [Electric railway engineering]. Tr. from English by L. V. Gutkina et al.; ed. by A. P. Mikheyev. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1957, 407 p. (In Russian)

6. Shevalyn V. A. *Vybor tyagovogo elektrodvigatelya* [The selection of a tractive motor]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1934, 126 p. (In Russian)

7. Khvostov V. S. *Teoriya tyagovogo dvygatelya elektrovoza* [The theory of a locomotive tractive motor]. *Trudy MIIT* [Proceedings of Moscow State Transport University] Publ., 1962, issue 156, pp. 4–136. (In Russian)

8. Gavrylov Y. I. & Mnatsakanov V. A. *Vagony metropolityena s impulsnyimi preobrazovatelyami* [Transit vehicles with switching converters]. Moscow, Transport Publ., 1986, 230 p. (In Russian)

9. Lebedev A. B. *Osnovy elektrycheskoy tyagy* [The fundamentals of electric traction]. Leningrad, ONTI (Joint Institute of Science and Technology) Publ., 1937, 620 p. (In Russian)

10. Mnatsakanov V. A. *Forsazhnyi tyagoviy pryvod* [Augmented towline]. *Zheleznodorozhniy transport* [Railroad transport], 2006, no. 2, pp. 50–54 (In Russian)

11. Shevalyn V. A. *Tyagoviye raschety elektrycheskykh zheleznykh dorog i tramvayev* [Grade computations of electric railways and street cars]. Leningrad, Kubuch, 1931, 336 p. (In Russian)

12. Osypov S. I., Osypov S. S. & Feoktystov V. P. *Teoriya elektrycheskoy tyagy* [The theory of electric traction]. Moscow, Marshrut Publ., 2006, 435 p. (In Russian)

МНАЦАКАНОВ Валерий Александрович – канд. техн. наук, генеральный директор, член-корреспондент Российской инженерной академии, kamotltd@gmail.com (ООО «ТОМАК ЛТД»).