Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 https://naukovedenie.ru/

Том 9, №6 (2017) https://naukovedenie.ru/vol9-6.php

URL статьи: https://naukovedenie.ru/PDF/122TVN617.pdf

Статья опубликована 17.01.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:
Зарифьян А.А., Гребенников Н.В., Талахадзе Т.З. Концепция повышения энергетической эффективности тепловозной тяги // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №6 (2017) https://naukovedenie.ru/PDF/122TVN617.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 629.424

Зарифьян Александр Александрович
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону[1]
Профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство»
Доктор технических наук
E-mail: zarifian_aa@mail.ru

Гребенников Николай Вячеславович
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону
Доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство»
Кандидат технических наук
E-mail: grebennikovnv@mail.ru

Талахадзе Темур Зурабович
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону
Аспирант кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство»
E-mail: kryzhevskiy91@mail.ru

Концепция повышения энергетической эффективности тепловозной тяги

Аннотация. Улучшение тягово-энергетических показателей локомотивов имеет особое значение для мощных многоосных и многосекционных локомотивов, работающих с порожними составами на участках с равнинным профилем. В результате использование мощности локомотивов при работе с неполной нагрузкой становится чрезвычайно низким. Можно сказать, что все возрастающая мощность современных локомотивов вступает в противоречие с возможностями её полной реализации в условиях эксплуатации.

В настоящей работе представлены основные положения концепции повышения энергетической эффективности локомотивной тяги, основанной на применении дискретно-адаптивного управления тяговым электроприводом и силовой энергетической установкой локомотива.

Используя методы теории тяги поездов получены баланс сил в режиме тяги, баланс мощностей в режиме тяги и энергетический баланс в виде, необходимом для решения задачи о минимизации потребляемой локомотивом энергии.

[1] 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2

Приведен способ дискретно-адаптивного управления (ДАУ) тяговым электроприводом, обеспечивающий повышение энергетической эффективности электровоза при работе с неполной нагрузкой и рассмотрена возможность его применения для тепловоза.

Предлагается применение двухуровневой оптимизации энергопотребления тепловоза при работе с неполной нагрузкой: на первом уровне, согласно алгоритму ДАУ, определяется число ТЭД, которые могут обеспечить достаточную тяговую мощность, а на втором уровне оптимизировать работу силовой энергетической установки.

Ключевые слова: локомотивная тяга; энергетическая эффективность; энергетический баланс; дискретно-адаптивное управление тягой

Введение

Чтобы успешно и эффективно осваивать грузовые перевозки по железным дорогам России, необходимо не только повышать массу поездов и пропорционально увеличивать число движущих осей и мощность локомотивов, но и решить ряд технических задач, направленных на улучшение их тягово-энергетических показателей. Особое значение это имеет для мощных многоосных и многосекционных локомотивов, работающих с порожними составами на участках с равнинным профилем. В результате использование мощности локомотивов в порожняковом направлении становится чрезвычайно низким. Можно сказать, что все возрастающая мощность современных локомотивов вступает в противоречие с возможностями её полной реализации в условиях эксплуатации.

В условиях Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД) такая ситуация имеет место на подходах к экспортным морским портам Азово-Черноморского бассейна.

В настоящей работе представлен ряд положений предлагаемой концепции повышения энергетической эффективности локомотивной тяги, основанной на применении дискретно-адаптивного управления тяговой системой локомотива [1].

Показатели энергетической эффективности локомотивной тяги

Энергетическая эффективность локомотивной тяги характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД) и коэффициентом использования мощности (КИМ).

Мгновенное значение КПД локомотива $\eta_л$ может быть представлено как

$$\eta_л = \frac{P_{пол}}{P_{потр}} = \frac{P_т}{P_т + P_п + P_{сн}}, \quad (1)$$

где: $P_{пол}$ – полезная мощность, кВт;

$P_{потр}$ – потребляемая мощность, кВт;

$P_{т}$ – мощность на тягу поезда (касательная мощность), кВт, причем $P_{т} = P_{пол}$;

$P_{п}$ – мощность потерь, кВт;

$P_{сн}$ – мощность, затрачиваемая на собственные (вспомогательные) нужды, кВт.

Потребляемая мощность $P_{потр}$ находится через потребление электроэнергии из контактной сети (для электровоза) или дизельного топлива (для тепловоза).

Касательная мощность локомотива (мощность на тягу поезда) $P_{т}$, кВт, равна

$$P_{т} = F_{т} \cdot V, \qquad (2)$$

где: $F_{т}$ – касательная сила тяги электровоза, кН; V – скорость движения, м/с.

Если же скорость V взята в км/ч, то полезная мощность $P_{т}$, кВт, будет вычисляться как:

$$P_{т} = \frac{F_{т} \cdot V}{3,6}. \qquad (2^*)$$

Необходимо различать КПД локомотива как силовой установки (именно это значение указывается в технической документации) и КПД эксплуатационный, который зависит от времени работы локомотива в различных режимах при движении поезда и от расхода энергии на поддержание локомотива в работоспособном состоянии во время стоянок.

Коэффициент использования мощности γ представляет собой отношение мощности, реализуемой локомотивом $P_{т}$, к его доступной номинальной (часовой или продолжительной) мощности $P_{ном}$:

$$\gamma = \frac{P_{т}}{P_{ном}}. \qquad (3)$$

Отметим, что $P_{ном}$ в (3) равна произведению паспортной мощности одного ТЭД на число работающих в данный момент ТЭД:

$$P_{ном} = P_{ТЭД} \times N_{ТЭД}. \qquad (4)$$

Основные соотношения теории локомотивной тяги

Запишем соотношения теории локомотивной тяги [2], связанные с расчетом полезной работы локомотива, совершенной на некотором перегоне, длину которого обозначим как S. План и профиль пути полагаем известными, в дальнейшем отсюда получаем спрямленный профиль пути, необходимый для проведения тяговых расчетов. Пример спрямленного профиля равнинного участка пути СКЖД показан на рис. 1. Как видно, спрямленный профиль состоит из элементарных участков, в пределах каждого из таких участков уклон i постоянен (i измеряется в ‰.).

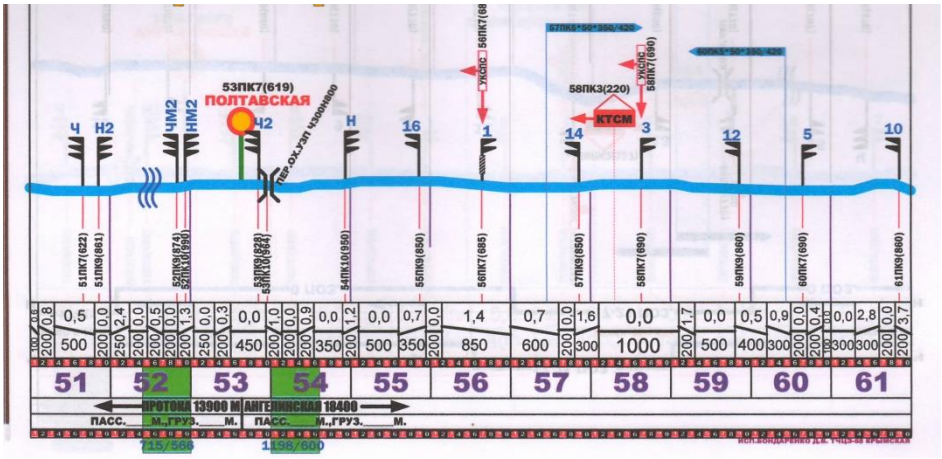

Рисунок 1. *Спрямленный профиль реального равнинного участка (пример) (составлено авторами)*

Простейшая модель механики движения поезда, принятая в тяговых расчетах, построена на основе следующих рассуждений.

Общее представление о движущемся поезде дает его расчетная схема (рис. 2). На ней поезд показан как связка локомотива и состава вагонов, сцепленных вместе упруго-диссипативными связями. Длина поезда обозначена как $l_п$.

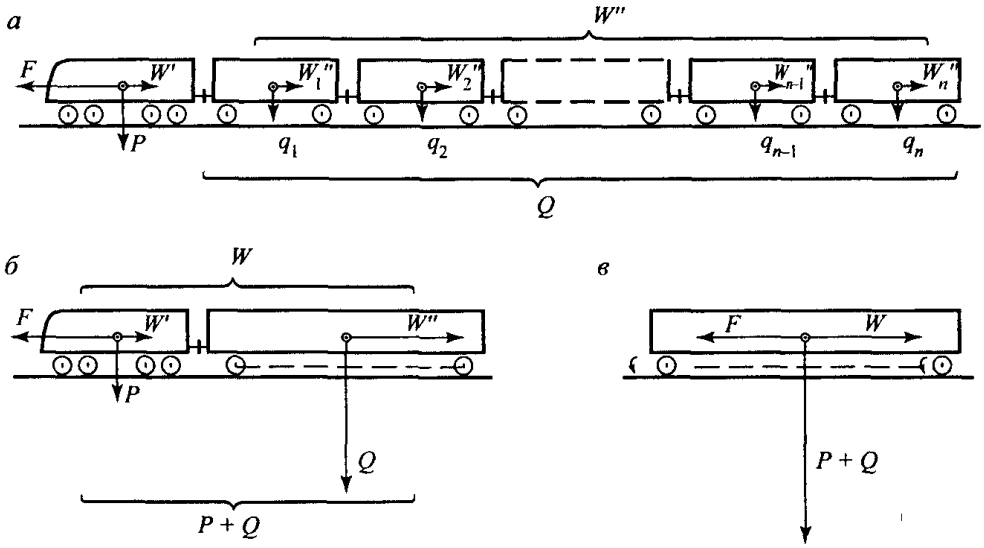

Рисунок 2. *Расчетные схемы сил, действующих на поезд при его движении ([2])*

На поезд целиком и на его составные элементы по отдельности действуют горизонтальные силы: движущая сила F и силы сопротивления движению составных частей поезда W', W_1'', ..., W_n'', а также вертикальные силы тяжести его составных частей: вес локомотива P и веса вагонов q_1, ..., q_n. Суммарный вес вагонов обозначен Q. Поезд, как система связанных между собой элементов, движется поступательно с общей для всех элементов скоростью V.

Будем подразумевать следующие упрощения: не принимаются во внимание многие, несущественные для анализа детали, например, техническое состояние вагонов и локомотива (достаточно того, что они могут двигаться в составе), их вертикальные и поперечные колебания и т. д.

Тем не менее, число даже только принятых во внимание на схеме рис. 2*а-б*, переменных величин делает их систему неудобной для анализа.

Будем исходить из упрощенной схемы, представляющей поезд как твердое тело некоторой массы, сосредоточенной в его центре масс (рис. 2*в*). Таким образом, пренебрегаем конечной длиной поезда, а его полезное движение считаем поступательным [2].

Массу локомотива обозначим как $m_{лок} = P/g$, состава – как $m_{сост} = Q/g$ (g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения). Тогда масса поезда $m = = m_{лок} + m_{сост} = (P + Q)/g$.

Для записи кинетической энергии с учетом вращающихся элементов конструкции (колесные пары, роторы тяговых электродвигателей и т. п.), вводится в рассмотрение величина γ – коэффициент инерции вращающихся частей.

Тогда приведенная масса поезда запишется как

$$m^* = m\cdot(1 + \gamma) = (m_{лок} + m_{сост})\cdot(1 + \gamma). \quad (5)$$

К внешним силам относятся касательная сила тяги локомотива ($F_К$), силы сопротивления движению поезда ($W_К$), скатывающие силы при движении по уклонам ($W_{ск}$) и тормозная сила поезда ($B_Т$).

Касательной силой тяги локомотива $F_К$ (или же $F_т$) называется внешняя управляемая сила, создаваемая первичным двигателем локомотива при взаимодействии его колес с рельсами и направленная в сторону движения.

Силами сопротивления движению называются возникающие в процессе движения внешние неуправляемые силы, направленные в сторону, противоположную движению, величину этих сил обозначим как $W_К$. К их числу относятся силы сопротивления воздуха, силы трения в подшипниках и т. п., которые зависят от скорости и массы поезда.

При движении по участкам, имеющим подъем, возникают скатывающие силы $W_{ск}$, направленные противоположно движению. При движении под уклон, скатывающие силы направлены в сторону движения.

Тормозными силами $B_Т$ называются искусственно вызываемые машинистом внешние управляемые силы, направленные в сторону, противоположную движению, и предназначенные для уменьшения скорости движения поезда или полной его остановки. При работе локомотива в режиме тяги тормозные силы отсутствуют.

Дифференциальное уравнение движения поезда запишем в проекции на касательную ось x, направленную в сторону движения поезда:

$$x : m^* \frac{dv_x}{dt} = F_{1x} + ... + F_{nx}, \quad (6)$$

где обозначено:

t – время, с;

$v_x = V$ – скорость, м/с;

m^* – приведенная масса поезда, кг;

F_{kx} – проекции действующих сил, Н (k = 1, …, n).

Первое слагаемое в правой части уравнения (6) представляет собой силу тяги, которая при работе локомотива в режиме тяги направлена всегда в сторону движения:

$$F_{1x} = F_{\text{т}} > 0. \tag{7}$$

Далее, в правой части уравнения (6) присутствуют силы сопротивления, которые всегда направлены противоположно движению:

$$F_{2x} = -W_{\text{К}}(V) < 0. \tag{8}$$

Силы сопротивления $W_{\text{К}}(V)$ для поезда массы m зависят от скорости движения V и вычисляются согласно ПТР (пример показан на рис. 3).

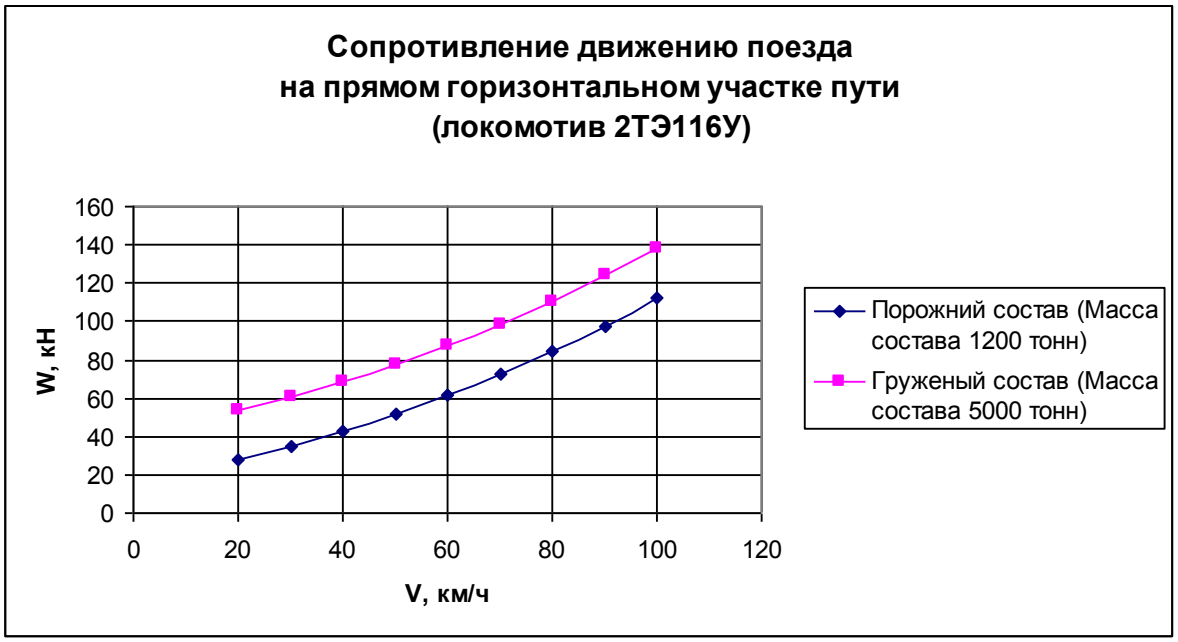

Рисунок 3. *Силы сопротивления $W_{\text{К}}(V)$ для поездов различной массы (составлено авторами)*

Действие скатывающих сил, которые представляют собой проекцию силы тяжести на направление движения, учитывается следующим образом. При движении по участкам, имеющим подъем, возникают скатывающие силы $W_{\text{ск}x} = -mgi$, направленные противоположно движению, здесь $i > 0$ измерено в ‰. При движении под уклон, когда $i < 0$, скатывающие силы направлены в сторону движения: $W_{\text{ск}x} = +mgi$.

Отсюда

$$F_{3x} = -mgi\,, \tag{9}$$

причем уклон $i > 0$ при движении на подъем, и $i < 0$ на спуске.

Наконец, в режиме тяги тормозные силы $B_{\text{Т}}$ отсутствуют, то есть

$$F_{4x} = B_{\text{Т}} = 0\,.$$

Тогда (6), с учетом принятых обозначений, принимает вид

$$x : m * \frac{dV}{dt} = F_{\text{т}} - W_{\text{К}} - mgi\,. \tag{6*}$$

Баланс сил в режиме тяги

Из (6*) получаем уравнение кинетостатики

$$F_{инx} + F_т - W_К(V) - mgi = 0, \quad (10)$$

где проекция силы инерции на ось *x* равна

$$F_{инx} = -m * \frac{dV}{dt}. \quad (11)$$

Из уравнения (10) выражаем силу тяги

$$F_т = -F_{инx} + W_К(V) + mgi. \quad (12)$$

и получаем баланс сил в режиме тяги

$$F_т = m * \frac{dV}{dt} + W_К(V) + mgi. \quad (13)$$

Замечание. Локомотив оснащен многодвигательным тяговым электроприводом, поэтому суммарная сила тяги $F_т$ складывается из сил тяги, реализуемых всеми обмоторенными осями.

Баланс мощностей в режиме тяги

Перейдем к рассмотрению баланса мощностей, для чего умножим выражение (13) на скорость *V*. Получим

$$F_т \cdot V = m * \frac{dV}{dt} \cdot V + W_К(V) \cdot V + mgi \cdot V. \quad (14)$$

Мощность локомотива на тягу в данный момент времени (левая часть выражения (14)) равна произведению силы тяги на скорость:

$$P_т = F_т \cdot V. \quad (15)$$

Мощность сил инерции (первое слагаемое в правой части выражения (14)) представляет собой производную по времени от кинетической энергии поезда:

$$P_{ин} = m * \frac{dV}{dt} \cdot V = \frac{dT}{dt}, \quad (16)$$

где: $T = \frac{1}{2} m * \cdot V^2$ – кинетическая энергия поезда, который движется со скоростью *V*.

Мощность действующих на поезд сил сопротивления (второе слагаемое в правой части выражения (17)) равна

$$P_{сопр} = W_К(V) \cdot V. \quad (17)$$

Мощность скатывающих сил (третье слагаемое в правой части выражения (14)) равна

$$P_{\text{ск}} = mgi \cdot V \quad . \tag{18}$$

Таким образом, из (14)-(18) получаем баланс мощностей в данный момент времени t:

$$P_{\text{т}} = P_{\text{ин}} + P_{\text{сопр}} + P_{\text{ск}} \quad , \tag{19}$$

то есть, при работе локомотива в режиме тяги его полезная мощность $P_{\text{т}}$ в каждый момент времени равна сумме мощностей сил инерции, сил сопротивления и скатывающих сил.

Замечание. Поскольку локомотив оснащен многодвигательным тяговым электроприводом, его полезная мощность (мощность на тягу) $P_{\text{т}}$ складывается из мощностей, создаваемых работающими тяговыми электродвигателями. Полезная мощность локомотива $P_{\text{т}}$ равна потребляемой им мощности $P_{\text{потр}}$, умноженной на значение его КПД в данный момент, то есть $P_{\text{т}} = P_{\text{потр}} \cdot \eta$.

Энергетический баланс

Перейдем к рассмотрению работы, совершенной локомотивом за время прохождения $t_{12} = t_2 - t_1$ некоторого элементарного участка $k_1 - k_2$ спрямленного профиля с постоянным уклоном i (см. рис. 1) при движении поезда по перегону. Для этого умножим (19) на dt и проинтегрируем по времени:

$$\int_{t_1}^{t_2} P_{\text{т}} dt = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ин}} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{сопр}} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ск}} dt \quad . \tag{20}$$

Отметим особо, что для получения полезной работы, совершенной локомотивом за полное время движения поезда по перегону, необходимо будет выполнить суммирование по всем элементарным участкам, из которых состоит перегон.

Полезная работа, совершенная локомотивом при перемещении поезда по этому элементарному участку, находится в левой части (20) и определяется выражением

$$A_{12}^{\text{пол}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{т}} dt \quad . \tag{21}$$

Работа сил инерции на этом же перемещении, с учетом (16), будет равна разности значений кинетической энергии поезда:

$$A_{12}^{\text{ин}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ин}} dt = \int_{t_1}^{t_2} dT = T_2 - T_1 = \frac{1}{2} m^* \cdot (V_2^2 - V_1^2) \quad , \tag{22}$$

то есть работа сил инерции обеспечивает изменение скорости движения.

Далее, работа сил сопротивления

$$A_{12}^{\text{сопр}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{сопр}} dt \quad . \tag{23}$$

Работа скатывающих сил

$$A_{12}^{\text{ск}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ск}} dt,$$

с учетом (18) получаем

$$A_{12}^{\text{ск}} = mg\int_{t_1}^{t_2} iVdt = mg(h_2 - h_1), \tag{24}$$

то есть равна работе сил тяжести (здесь h_1, h_2 – высота концов элементарного участка над уровнем моря).

Если же концы участка находятся на одной высоте над уровнем моря, то получим $A_{12}^{\text{ск}} = 0$.

Окончательно, согласно (20)-(24), получаем для полезной работы следующее выражение (энергетический баланс):

$$A_{12}^{\text{пол}} = \frac{1}{2} m^* \cdot (V_2^2 - V_1^2) + mg(h_2 - h_1) + A_{12}^{\text{сопр}}. \tag{25}$$

Приходим к выводу, что полезная работа локомотива на каждом элементарном участке с постоянным уклоном i затрачивается на увеличение скорости движения при разгоне (то есть на увеличение кинетической энергии поезда), на преодоление скатывающей силы при движении на подъем (то есть на увеличение потенциальной энергии), и на преодоление основного сопротивления (во все время движения). Из самой структуры выражения (25) становится очевидным, что существенно уменьшить значение полезной работы грузового локомотива, ведущего поезд по заданному участку в заданном графике, не удастся, каким бы опытом работы и навыками ни обладал машинист.

Полная полезная работа на всем перегоне $A_{\Sigma}^{\text{пол}}$ будет складываться из элементарных работ вида (25).

Постановка задачи минимизации энергопотребления

Перейдем к постановке задачи минимизации энергопотребления. Прежде всего, сформулируем ограничения.

а) Должен соблюдаться график движения, то есть время движения по перегону задано:

$$t_{\Sigma} = \text{const}. \tag{26}$$

б) Величины скорости и ускорения при разгоне и торможении не должны превышать допустимых значений, что диктуется требованиями безопасности движения:

$$|V| \le [V], \quad |a| \le [a]. \tag{27}$$

При соблюдении этих ограничений, потребление локомотивом энергии за время движения по перегону должно быть минимальным:

$$E_{\Sigma} = \int_{0}^{t_{\Sigma}} P_{\text{потр}} dt \to \min, \tag{28}$$

где: $P_{\text{потр}}$ – мгновенное значение потребляемой локомотивом мощности.

Например, если локомотив представляет собой электровоз постоянного тока, то потребляемая им мощность равна произведению мгновенных значений напряжения контактной сети $U_{\text{кс}}$ и потребляемого электровозом тока $I_{\text{кс}}$:

$$P_{\text{потр}} = U_{\text{кс}} I_{\text{кс}} .$$

Если же локомотив представляет собой тепловоз, то потребляемая им мощность находится как тепловой эквивалент мгновенного расхода дизельного топлива.

В результате приходим к задаче Лагранжа (28), где критерием оптимальности при движении поезда по перегону является потребление энергии – интегральный функционал вида

$$E_{\Sigma} = \int_{0}^{t_{\Sigma}} P_{\text{потр}} dt , \tag{29}$$

а искомыми величинами являются управляющие воздействия, доставляющие ему минимум.

Отметим, что в [3] и многих других публикациях, на которых построена идеология так называемой «системы автоведения поездов», проводится минимизация не потребленной локомотивом энергии (29), а полезной работы, совершенной локомотивом $A_{\Sigma}^{\text{пол}}$.

В результате, оказывается не принятым во внимание то обстоятельство, что при работе с неполной нагрузкой (например, при ведении порожних грузовых поездов по равнинным участкам типа показанных на рис. 1), КПД локомотива резко снижается, а, следовательно, возрастает непроизводительное потребление энергии. На это обращалось внимание во многих публикациях [4-9], главным образом для электрической тяги.

Это позволяет ставить вопрос об отключении части движущих осей с целью повышения общей энергетической эффективности локомотивов – как электровозов, так и тепловозов. Вопрос частичного отключения двигателей, в течение многих лет то получавший признание, то вновь отвергавшийся, в сегодняшних условиях может быть сформулирован более определенно: чем большее число движущих осей имеет локомотив, тем актуальнее необходимость и рациональность варьирования числа движущих осей, реализующих силу тяги.

Аналогии с гужевой и паровой тягой

Гужевой транспорт – это вид транспорта, в котором для перемещения людей и грузов используется сила животных. В качестве тягловой силы используются главным образом лошади, а также волы, олени и т. п. До появления железных дорог и автомобилей все сухопутные перевозки осуществлялись гужевым транспортом.

Термин «лошадиная сила» был введен в обращение Джеймсом Уаттом для того, чтобы показать, работу скольких лошадей способна заменить его паровая машина. Мощность «1 метрическая лошадиная сила» в системе СИ эквивалентна 735,5 Вт.

Необходимо отметить, что лошадь – если ее рассматривать в качестве локомотива, – сочетает в себе:

а) силовую энергетическую установку (топливом является овес);

б) передачу мощности (ноги);

в) движитель (копыта, отталкивающиеся от дороги).

Подчеркнем, что число запряженных в повозку лошадей обусловлено нагрузкой. По существовавшим около 200 лет назад правилам, при перевозке пассажиров в почтовых кибитках можно было впрягать трёх лошадей, только если людей оказывалось трое, тогда как двое или один должны были ехать на паре лошадей. Тройка была предназначена для быстрой езды на длинные расстояния, причем развивалась очень высокая скорость 45-50 км/ч. Для передвижения тяжелой повозки запрягали четыре – шесть лошадей, и даже больше.

Таким образом, в эпоху гужевого транспорта «мощность на тягу» запряженных лошадей подбиралась под конкретную нагрузку: чем больше пассажиров и выше скорость, тем больше требовалось лошадей в упряжке (рис. 4). Причем «мощность упряжки в лошадиных силах» представляет собой дискретную величину, равную числу тянущих повозку лошадей, увеличить её можно, запрягая пристяжных.

Рисунок 4. *Упряжка десяти лошадей (общедоступный Интернет-источник)*

Паровоз – автономный локомотив с паросиловой установкой (котел и паровая машина), обеспечивающий за счет энергии пара необходимую силу тяги для движения по рельсовой колее. Нагретый пар из котла поступает в цилиндры машины, где его тепловая энергия преобразуется в механическую энергию возвратно-поступательного движения поршня, которая через кривошипно-шатунный механизм приводит во вращение колеса.

В 1987 году был опубликован проект паровоза с регулируемым числом работающих цилиндров [10] (рис. 5). Пар под давлением 32 атмосферы через 16 комплектов электроуправляемых клапанов подается в паровые машины. Когда машинист открывает регулятор, он направляет пар либо в 1, либо в 2, 3 … и наконец, во все 8 блоков цилиндров. Таким образом, у такого паровоза было бы восемь ступеней регулирования силы тяги за счет управляемого отключения/подключения паровых машин.

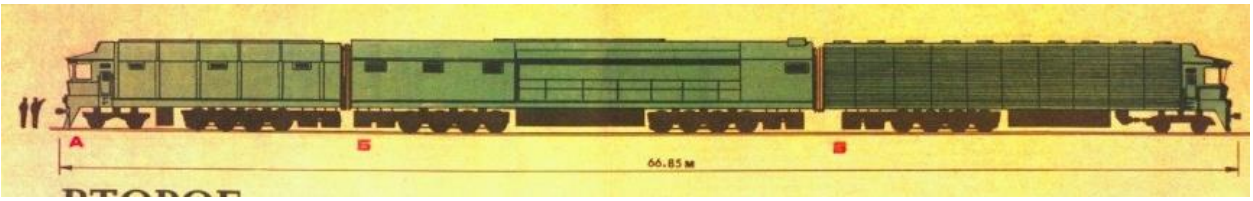

Рисунок 5. *Проект паровоза с регулируемым числом работающих цилиндров ([10])*

Повышение энергетической эффективности электрической тяги

Способ дискретно-адаптивного управления (ДАУ) тяговым электроприводом, обеспечивающий повышение энергетической эффективности электровоза при работе с неполной нагрузкой, запатентован [1].

Способ заключается в том, что регулируется число одновременно работающих тяговых двигателей. Отключение или подключение тяговых двигателей происходит автоматически в соответствии с закономерностью, представленной в форме функциональной зависимости эксплуатационного КПД локомотива (1) от КИМ (3) вида, показанного на рис. 6. Зависимость КПД от КИМ получена путем обработки записей бортового регистратора параметров движения.

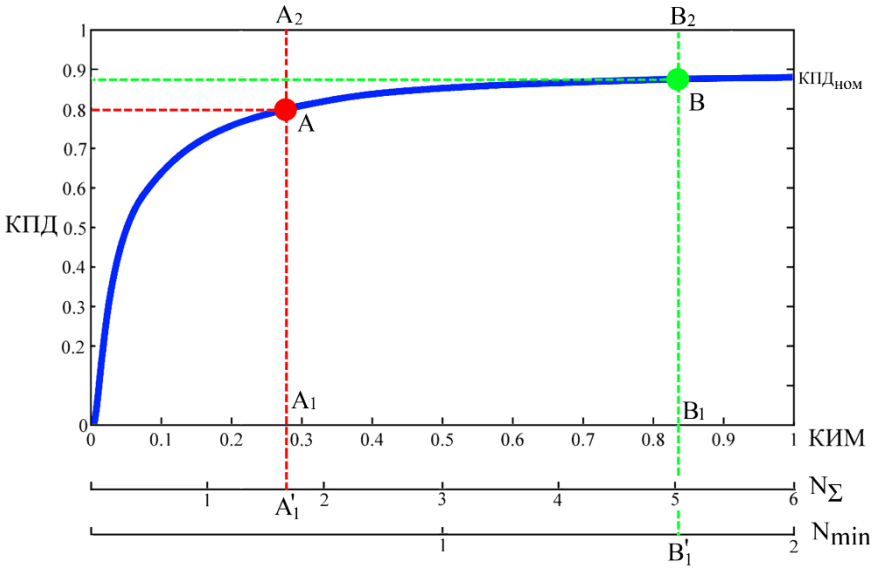

Рисунок 6. *КПД электровоза в зависимости от КИМ в режиме тяги ([1])*

Поскольку на современных электровозах – например, ЭП20, 2ЭС5 и других – имеется возможность поосного регулирования силы тяги, вопрос оперативного отключения/подключения одного или нескольких тяговых двигателей в автоматическом режиме может быть решен на верхнем уровне системы управления.

Концепция повышения энергетической эффективности тепловозной тяги

КПД тепловоза $\eta_л$ (1) можно представить как:

$$\eta_{\text{л}} = \eta_{\text{дгу}} \cdot \eta_{\text{эпм}}, \qquad (30)$$

где: $\eta_л$ – КПД тепловоза в режиме тяги;

$\eta_{\text{дгу}}$ – КПД дизель-генераторной установки;

$\eta_{\text{эпм}}$ – КПД электрической передачи мощности.

Отметим, что КПД дизель-генераторной установки $\eta_{\text{дгу}}$ при работе с малой нагрузкой уменьшается на 10 % (от 36 % до 26 %) по сравнению с работой при номинальной нагрузке

(рис. 7). Прослеживается определенная аналогия в характере изменения кривых, показанных на рис. 6 и 7.

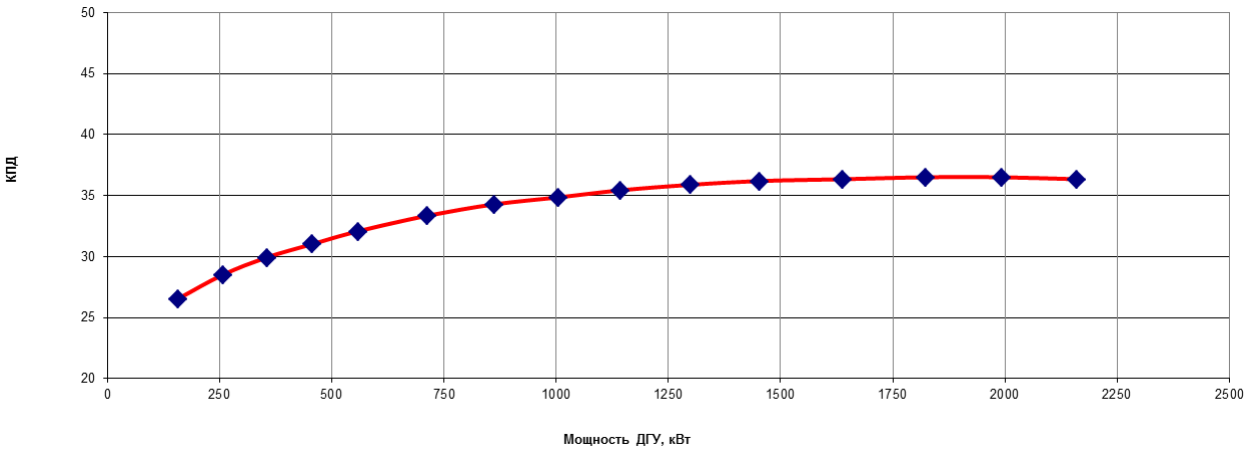

Рисунок 7. *КПД дизель-генераторной установки в зависимости от степени использования доступной мощности (составлено авторами)*

Электрическая передачи мощности тепловоза при наличии поосного регулирования ТЭД ничем не отличается по своей структуре от аналогичного тягового привода электровоза, и к ней может быть применен алгоритм ДАУ.

Следовательно, представляется целесообразным проведение двухуровневой оптимизации энергопотребления тепловоза при работе с неполной нагрузкой: на первом уровне, согласно алгоритму ДАУ, определяется число ТЭД, которые могут обеспечить достаточную тяговую мощность.

Далее, необходимо оптимизировать работу ДГУ (второй уровень). Отметим, что в технической литературе активно обсуждается идея применения нескольких дизелей. Фирма Bombardier несколько лет назад выпустила тепловоз Traxx DE ME, оснащенный четырьмя дизелями [11]. На первый взгляд, замена одного двигателя на четыре может показаться нелогичной, но это дает ряд важных преимуществ перед тепловозом с моноблочной ДГУ.

Во-первых, применяемый на этом тепловозе дизель Caterpillar C18 представляет собой стандартный шестицилиндровый четырехтактный двигатель, выпускаемый преимущественно для морского рынка и широко используемый во всем мире. Это приносит все выгоды от конструкции двигателя массового рынка, с общими компонентами и глобальной сетью технической поддержки на местах. Это также означает, что производитель больше не привязан к одному поставщику двигателей, а силовые блоки могут быть выбраны в соответствии с потребностями заказчика.

Во-вторых, Bombardier утверждает, что Traxx DE ME может предложить почти 100%-ную доступность, потому что даже при одном отключенном двигателе три двигателя обеспечивают достаточную мощность для создания максимального тягового усилия в 300 кН.

В-третьих, поскольку четыре двигателя работают вместе, чтобы оптимизировать расход топлива, Traxx DE ME на 10 % экономичнее, чем эквивалентный однодизельный локомотив. Как правило, тепловозы используют свою установленную мощность только во время разгона и движения на подъем. Это означает, что при работе с легкими поездами, а также при движении по равнине полная мощность дизельного двигателя вряд ли используется.

Traxx DE ME преодолевает это ограничение, потому что при каждом изменении нагрузки локомотив сам определяет, сколько двигателей потребуется для ведения поезда в

каждой конкретной ситуации. Это также гарантирует, что количество часов работы и средняя нагрузка остаются согласованными между всеми четырьмя двигателями.

Нами предлагается вместо моноблочной ДГУ применять модульную, причем число модулей должно соответствовать числу ТЭД (рис. 8). Мощность одного модуля обеспечивает работу одного ТЭД (с некоторым запасом на обеспечение вспомогательных нужд).

На рис. 8 обозначено:

НЭ – накопитель энергии (аккумуляторные батареи и супер-конденсаторы);

ВН – отбор на вспомогательные нужды;

АИН – автономный инвертор напряжения;

АТД – асинхронный тяговый двигатель;

К – контроллер.

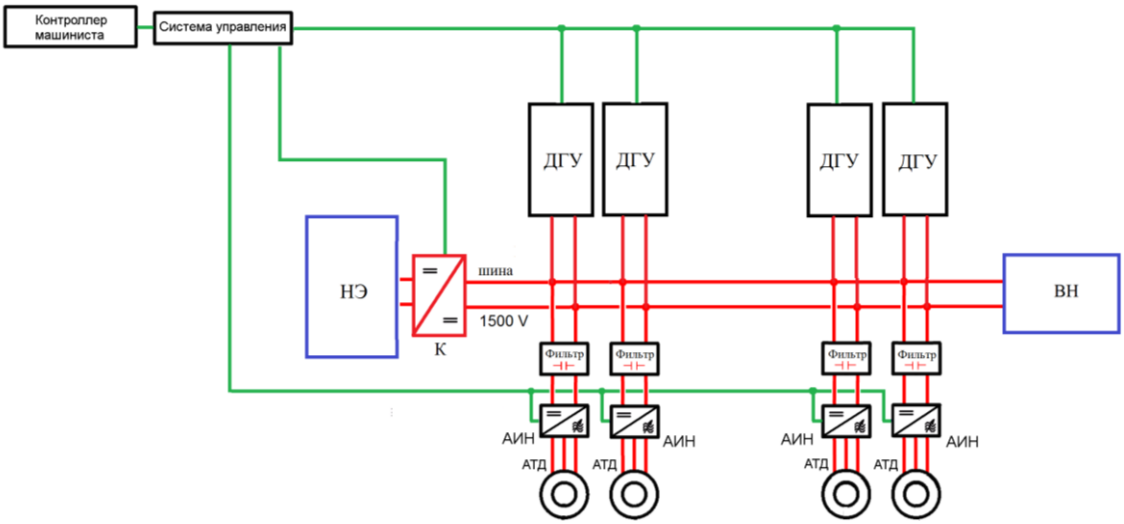

Рисунок 8. *Принципиальная схема силовой установки тепловоза с модульной ДГУ (составлено авторами)*

Подводя итог, подчеркнем, что предлагаемая концепция позволит существенно повысить энергетическую эффективность тепловозной тяги при работе с неполной нагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой / А. А. Андрющенко, А. А. Зарифьян, Ю. А. Орлов, К.П. Солтус // Патент RU 2617857; приоритет от 15.09.2015 – Бюлл. №13.
2. Кузьмич В. Д., Руднев В. С., Френкель С. Я. Теория локомотивной тяги – М.: Маршрут, 2005. – 448 с.
3. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов [и др.] – М.: Транспорт, 1990. – 272 с., глава 2 «Оптимальное управление движением поездов».
4. Сорокин, С. В. Повышение экономичности многосекционных электровозов переменного тока при вождении грузовых поездов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03, 05.09.01 – М.: МИИТ, 1991. – 24 с.
5. Крыгин, А. Н. Способы повышения эксплуатационной энергетической эффективности магистральных электровозов переменного тока: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.22.07 – Омск, ОмГУПС, 1998. – 22 с.
6. Мурзин, Д. В. Пути и средства расширения функциональных возможностей и повышения эффективности эксплуатируемых магистральных электровозов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.22.07 – Омск, ОмГУПС, 2000. – 21 с.
7. Фадеев, С. В. Повышение экономичности электровозов переменного тока за счет применения новых электронных систем управления: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.09.03 – М.: МИИТ, 2003. – 23 с.
8. Пыров, А. Е. Современные системы управления электровозами / А. Е. Пыров // Железнодорожный транспорт. – 2005. – №2. – С. 64-66.
9. Заручейский, А. В. Анализ научных подходов к повышению эффективности использования грузовых электровозов / А. В. Заручейский, Р. В. Мурзин, В. А. Кучумов, Н. Б. Никифорова // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – №1 – С. 37-41.
10. Паровоз XXI века? / О. В. Курихин // Техника молодежи, 1987, №1. – С. 31-35.
11. http://www.railjournal.com/index.php/locomotives/four-into-one.html.

Zarifyan Alexander Alexandrovich
Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: zarifian_aa@mail.ru

Grebennikov Nikolay Vyacheslavovich
Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: grebennikovnv@mail.ru

Talakhadze Temur Zurabovich
Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: kryzhevskiy91@mail.ru

The concept of increasing the energy efficiency of diesel locomotive traction

Abstract. Improving of the traction and energy characteristics of locomotives is a particular importance for powerful multi-axle and multi-section locomotives which operating with empty trains in areas with a flat profile. In a result, the using of the locomotive's power when it working with a partial load becomes extremely low.

It can be said that the increasing of the capacity of modern locomotives comes into conflict with the possibilities of its full implementation under operating conditions. In this paper, the main regulations of the concept of improving the energy efficiency of locomotive's traction, which based on the application of discrete-adaptive control of the locomotive's traction system are presented.

Using the theory of train's traction, the balance of forces, the balance of power and the energy balance are obtained in the form necessary to solve the problem of minimizing the energy consumed by the locomotive.

The method of discrete-adaptive control (DAC) is given by the electric traction drive, which providing the increase of the power efficiency of the electric locomotive when it work at partial load and possibility of its application for a locomotive is considered. The using of two-level optimization of diesel locomotive's power consumption when it work at partial load is proposed: at the first level, according to the DAC algorithm, the number of TED that can be provide sufficient traction power and the second level to optimize the operation of the power plant.

Keywords: locomotive's traction; energy efficiency; energy balance; discrete-adaptive traction control