



Экономический выбор параметров силовой установки гибридных локомотивов



Сергей КАЛУГИН

Sergey P. KALUGIN

Economic Choice of Parameters of Hybrid Locomotives' Power Plant
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 132)

Статья посвящена выбору параметров силовой установки гибридного локомотива (мощности первичного источника и ёмкости накопителя энергии) по критерию максимума экономической эффективности. Поскольку именно применение накопителя энергии, имеющего высокую рыночную стоимость, стимулирует поиск рациональных затрат на оборудование, исследуется возможность обеспечить наиболее выгодное соотношение эксплуатационных характеристик, в том числе на основе анализа выработки и расходования энергии тепловозным двигателем.

Ключевые слова: автономный транспорт, локомотив, гибридная силовая установка, накопитель энергии, стоимость, затраты, экономическая эффективность, оптимизация параметров.

Калугин Сергей Павлович – кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

На железных дорогах многих стран начата эксплуатация нового типа автономных локомотивов – с гибридной силовой установкой (гибридных локомотивов). Их особенность заключается в применении накопителя энергии совместно с первичным ее источником. Однако внедрение этой прогрессивной технологии сдерживается неопределенностью экономического эффекта – весьма существенным фактором ввиду высокой стоимости накопителя.

Применение достаточно емкого накопителя энергии в силовой цепи позволяет первичному источнику работать в наиболее экономичном режиме, а при необходимости (движении по затяжному подъему) локомотив получает возможность развивать мощность выше номинальной. При торможении опять же предусмотрен возврат энергии в накопитель. Во всех случаях он позволяет снизить долю времени переходных процессов в работе дизеля.

Анализу неблагоприятного влияния переходных процессов в энергетических установках тепловозов на их эксплуатационные характеристики посвящен ряд работ, в частности [1], где указывается, что наиболее эффективным способом облегчения

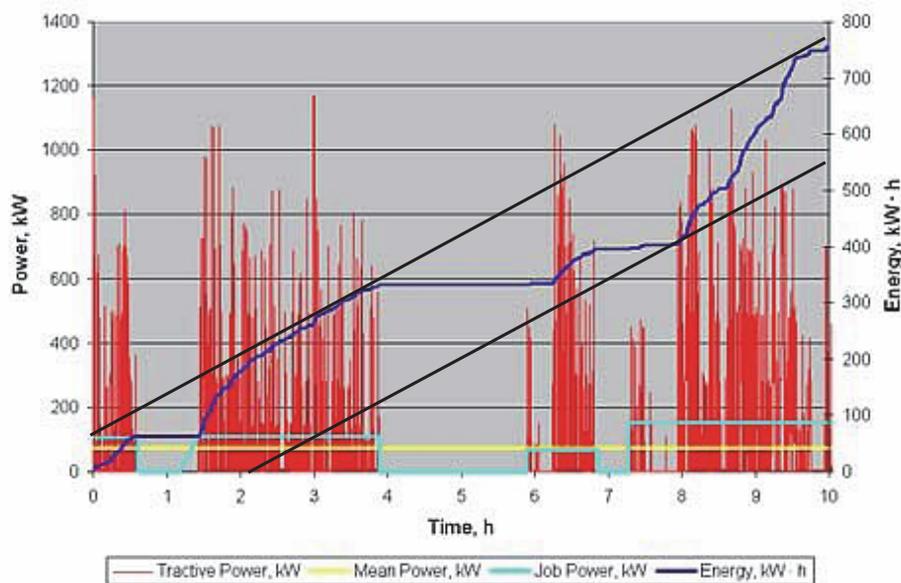


Рис. 1. Диаграмма выработки и расходования энергии на транспортном средстве. Ёмкость накопителя велика (мощность энергетической установки постоянна).

переходных процессов и снижения их доли во времени работы тепловозного дизеля является именно применение накопителей.

В данной статье выполнен анализ влияния соотношений параметров силовой установки и условий эксплуатации на экономический эффект от внедрения нового локомотива. Анализ основывается на изучении диаграммы выработки и расходования энергии на транспортном средстве, что выгодно отличает его от статистических методов (к примеру, рассмотренных в [2]).

На рис. 1 приведена диаграмма, построенная согласно [3]. Исходные данные взяты из [4]. Сущность диаграммы заключается в следующем. Две наклонные прямые изображают выработку энергии. Если накопитель в начале работы полностью разряжен, то из начала координат выходит верхняя прямая. Если же он полностью заряжен – то нижняя. Угол наклона прямых связан с мощностью первичного источника, а расстояние между ними представляет собой ёмкость накопителя. Кривая (или ломаная линия) изображает расходование энергии транспортным средством и является интегральной по отношению к зависимости мощности, потребляемой тяговыми двигателями, от времени (циклограмме рабочих режимов). Наклон кривой потребления энергии, меньший наклона пря-

мых, означает, что часть ее поступает в накопитель. При длительной стоянке (отсутствии потребления энергии) кривая проходит горизонтально и может коснуться нижней прямой, свидетельствуя о полном заряде накопителя. Во избежание перезаряда в такой ситуации первичный источник энергии надо перевести на холостой ход или заглушить. Касание кривой расходования энергии и верхней прямой означает истощение накопителя.

Кривую потребления энергии строят на основании расчета или по результатам опытных поездок, а необходимые для гибридного локомотива мощность первичного источника и ёмкость накопителя определяют путем построения наклонного коридора минимальной ширины и минимального наклона, в котором полностью помещается кривая потребления. Способ экспериментального получения данных для построения кривой расходования энергии маневровыми тепловозами, подробно описанный в [5], заключается в измерении свободной мощности дизель-генераторной установки бортовой системой, имеющей датчики тока и напряжения, с ежесекундной записью значений в течение смены. Простая математическая обработка информации позволяет получить искомую кривую.



Тип оборудования	Удельные параметры		Ресурс
	массовые	объемные	
Первичные источники	Вт/кг	Вт/литр	годы
Дизель-генераторы			
ПД1М	40,5	42,4	9,0
2А-5Д49	113	77,8	9,0
211Д-2	101	73,2	3,5 (30 тыс. час.)
Топливные элементы			
HD6 (Ballard) – PEMFC	214	113,6	нет данных
Фотон (УЭХК) – ШТЭ	62,5	37,3	0,5 (5000 час.)
Накопители	Вт • ч/кг	Вт • ч/литр	циклы (годы)
Аккумуляторы			
FNC A XR (Брилон)	19,6	-	нет данных
Свинцовые 52PzS-350P	29,4	67	8 лет
Литий-ионные (Лиотех) LT-LYT300	103	99	3000 (3 года)
Литий-полимерные (Kokam)	141	220	600 (2 года)
Литий-ионные (трамвай)	54,5	-	1000
Ni-MH (Тойота)	35	-	1000
Суперконденсаторы			
ВМОD0063-P125 Maxwell	2,4	1,4	более 10 ⁶
30ЭК502 «Элтон»	1,9	2,3	более 10 ⁶
30ЭК404 «Элтон»	2,6	3,6	более 10 ⁶

Математическим методом построения такого коридора служит линейная аппроксимация при чебышевской норме (линейное равномерное приближение). Возможно также графическое решение при помощи штурманской линейки.

Основными параметрами, определяющими целесообразность создания гибридных энергетических установок, являются:

- удельные массовая и объёмная мощности первичного источника;
- удельные массовая и объёмная ёмкости накопителя;
- стоимость первичного источника и накопителя;
- экономический эффект от применения накопителя;
- ресурс первичного источника и накопителя.

Зависимость ресурса накопителей от глубины разряда может быть учтена эмпирическими коэффициентами.

Первым условием создания гибридной установки становится возможность размещения первичного источника энергии и накопителя на транспортном средстве; условие имеет вид системы неравенств:

$$\begin{cases} \frac{N}{n_v} + \frac{E}{e_v} \leq V, \\ \frac{N}{n_m} + \frac{E}{e_m} \leq m, \end{cases} \quad (1)$$

где N – мощность первичного источника энергии, кВт;

E – ёмкость накопителя, кВт • ч;

n_v – удельная объёмная мощность, взятая с учетом технологических пространств (для обслуживания, диагностики и т.п.), кВт/куб.м;

e_v – удельная объёмная ёмкость накопителя, кВт • ч/куб. м;

V – объём машинного отделения транспортного средства, куб.м;

n_m – удельная массовая мощность, кВт/кг;

e_m – удельная массовая ёмкость, кВт • ч/кг;

m – максимально допустимая масса гибридной энергетической установки, ограниченная у тепловозов допустимой нагрузкой от оси на рельс.

В первом приближении уравнения (1) не учитывают вес топливного бака с топливом, обычно в несколько раз меньший, чем вес дизель-генераторной установки, и по-

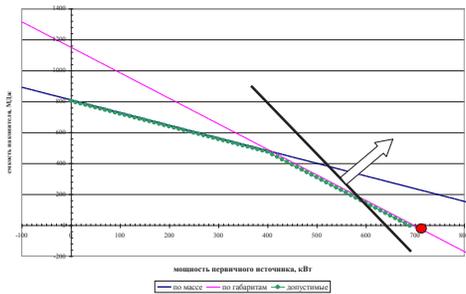


Рис. 2. Определение параметров силовой установки, обеспечивающих максимум прибыли. Первая ситуация: накопитель очень дорогой, максимум прибыли обеспечивается первичным источником энергии.

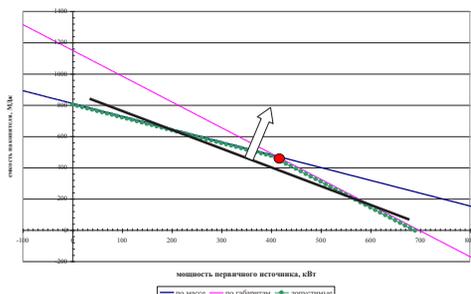


Рис. 3. Определение параметров силовой установки, обеспечивающих максимум прибыли. Вторая ситуация: максимум прибыли обеспечивается гибридной установкой.

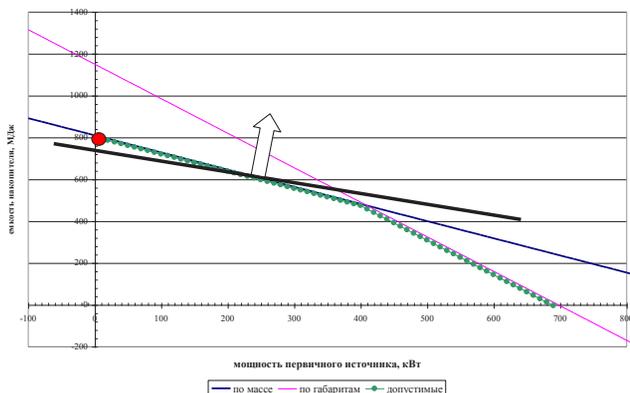


Рис. 4. Определение параметров силовой установки, обеспечивающих максимум прибыли. Третья ситуация: накопитель дешёвый, максимум прибыли достигается новой установкой (аккумулятором, конденсатором или маховиковым накопителем).

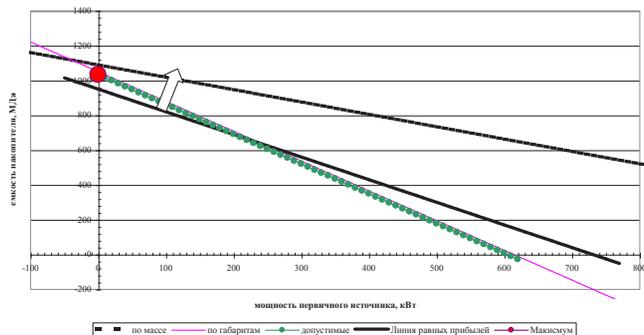


Рис. 5. Определение параметров силовой установки, обеспечивающих максимум прибыли. Точка пересечения находится в области отрицательных мощностей первичного источника.

этому не лимитирующий энерговооружённости локомотива.

Типичные значения указанных параметров для современных первичных источников энергии и накопителей приведены в таблице 1.

Целевая функция в предположении, что прибыль пропорциональна как мощности первичного источника, так и ёмкости накопителя, имеет вид:

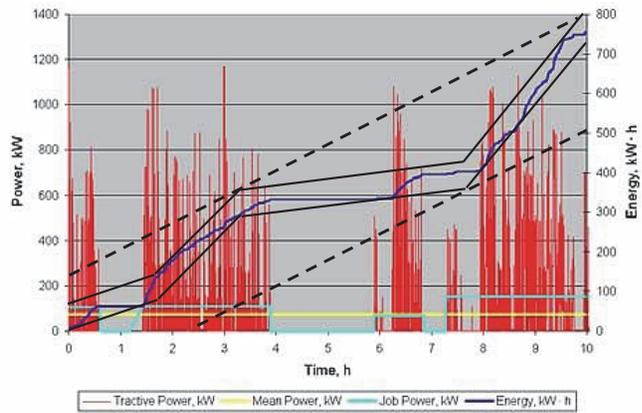
$$F = \alpha \cdot N + \beta \cdot E \rightarrow \max. \quad (2)$$

Коэффициенты α и β в выражении (2) равны разности затрат на соответствующий

узел, отнесенных к его ресурсу, и частного экономического эффекта от работы узла, отнесенного к единице его характеристики (в данном случае – мощности или ёмкости), с размерностями руб/(кВт • год) и руб/(МДж • год). Линии равной прибыли, таким образом, будут изображаться наклонными прямыми, а максимум функционала (2) отражать наибольшее удаление линии равной прибыли от начала координат. В общем случае эта линия является кривой, которая даже может быть немонотонной, и оптимальных точек может быть



Рис. 6. Диаграмма выработки и расходования энергии на транспортном средстве. Обозначены два накопителя энергии (работу суперконденсатора изображает «ломанный коридор»).



несколько. Характер линии равной прибыли требует отдельного исследования.

Графическое представление неравенств (1) и функционала (2) приведено на рис. 2-5. Выполненные расчёты показывают, что для большинства современных первичных источников и накопителей энергии ограничения образуют выпуклую область согласно рис. 3.

Сформулированная задача относится к хорошо известному классу задач линейного программирования, однако линейность основных зависимостей при определении экономически целесообразных параметров гибридных установок выступает лишь упрощающей гипотезой. В действительности в неравенствах (1) удельные показатели будут постоянными только для химических источников тока, а удельные показатели двигателей внутреннего сгорания (и электрических машин) зависят от номинальной мощности; эта зависимость известна в технике как масштабный фактор. Удельные показатели химических источников тока определяются электрохимической системой (т.е. свойствами топлива и окислителя, уравнением токообразующей реакции и т.д.) и, следовательно, свободны от влияния масштабного фактора.

Как видно из рис. 3, существует оптимальное сочетание удельных параметров первичного источника и накопителя, соответствующее сочетанию их ёмкости и мощности, определенному из диаграммы выработки и расходования энергии на тягу (рис. 1). Из вариантов, приведенных на рис. 2-5, следует, какой из параметров гибридной энергетической установки надо улучшать. Кроме того, анализ варианта, имеющего оптимум, не исключает такой прогноз: при экономической целесообразности создания

гибридных установок сравнительно небольшое улучшение характеристик накопителя сделает экономически обоснованным отказ от применения первичного источника и переход на электромобили.

Известно, что один накопитель не может удовлетворить одновременно обоим предъявляемым требованиям — ёмкости и интенсивности заряда и разряда (отдаваемой и принимаемой мощности). Решение заключается в применении двух накопителей. Один из них (обычно аккумулятор) обладает большой ёмкостью, но не может быстро заряжаться и разряжаться (точнее, может, но с существенным снижением КПД и ресурса). Другой (обычно суперконденсатор) имеет малую ёмкость (в 10-100 раз меньше), но может заряжаться и разряжаться практически мгновенно без ущерба для КПД и ресурса. Возникает проблема определения оптимальной разбивки общей ёмкости между двумя накопителями, решение которой сводится к построению «вложенного коридора» на диаграмме выработки и расходования энергии (рис. 6). Ёмкость двух разных накопителей связывается дополнительным ограничением:

$$N_{max} \leq (E_{\Sigma} - E_{ск}) \cdot n_E + N_{nu}, \quad (3)$$

где N_{max} — наклон самого крутого участка «ломаного коридора», то есть максимальная мощность, проходящая через цепь (суперконденсатор + тяговый двигатель) — (аккумулятор + первичный источник), кВт;

E_{Σ} — суммарная ёмкость накопителя (обоих накопителей), определенная по рис. 2, то есть ширина пунктирного коридора на рис. 6, МДж;

$E_{ск}$ — ёмкость суперконденсатора, то есть ширина «ломаного коридора» на рис. 6, МДж;

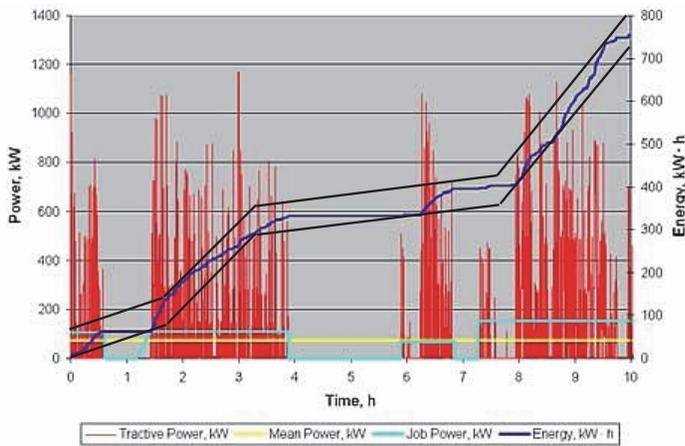


Рис. 7. Диаграмма выработки и расходования энергии на транспортном средстве. Емкость накопителя мала (мощность энергетической установки приходится изменять).

n_E — удельная отдача мощности аккумулятора, то есть максимальная мощность, отдаваемая аккумулятором заданной ёмкости по критерию экономичности или ресурса, кВт/МДж;

$N_{\text{ш}}$ — мощность первичного источника, кВт.

Силовое оборудование трех различных типов (дизель-генераторная установка, суперконденсатор, аккумулятор) будет описываться системой неравенств с тремя переменными. Соответственно задача типа изображенной на рис. 2 должна решаться на трехмерном многограннике.

В случае, если ёмкость накопителя, определенная по рис. 1, оказывается превосходящей допустимую по ограничениям системы неравенств (1), то мощность первичного источника энергии (дизеля) приходится изменять; ступенчатое изменение его мощности будет изображаться на диаграмме выработки и расходования энергии в виде переломов коридора, образованного линиями перезаряда и истощения накопителя (рис. 7). Как видно, потребная ёмкость накопителя при этом существенно снижается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совпадение мощности первичного источника энергии и ёмкости накопителя, определенных по рис. 1 и 6, позволяет достичь максимальной экономической эффек-

тивности гибридного локомотива. Однако применение на нем силовой установки, не оптимизированной для условий эксплуатации, приводит к существенному снижению экономического эффекта: по данным [2], разница может достигать до 20 тыс. евро/год.

Эти выводы не учитывают свойства топлива и способы его хранения в характеристиках первичных источников энергии. В тех случаях, когда параметры топлива являются лимитирующими (газотепловоз), необходимо будет их учесть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никипель С. О. Повышение эффективности работы тепловозов при применении накопителя энергии в силовой цепи / Дис... канд. техн. наук. — М.: МИИТ, 2011. — 167 с.
2. Amine Jaafar, Bruno Sareni, and Xavier Roboam. A Systemic Approach Integrating Driving Cycles for the Design of Hybrid Locomotives. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 62 (2013), Iss. 8, pp. 3541–3550.
3. Беляев А. С., Зуев Г. В., Калугин С. П. Метод выбора параметров силового оборудования гибридных локомотивов на топливных элементах // Труды науч. — практ. конфер. «Неделя науки-2009». — В 2-х частях. — Ч. 1. — М.: МИИТ, 2009. — С. 1–11.
4. Miller, A. R., Erickson, T. L., Dippo, J. L., Eisele, R. I., Johnson, M. D., and Lambrecht, T. Hydrogen fuel-cell locomotive: switching and power-to-grid demonstrations. Proceedings of World Congress on Railway Research, Lille, France, 22–26 May 2011.
5. Попов К. М. Выбор и обоснование параметров автоматизированной адаптируемой к условиям эксплуатации системы учета и анализа расхода топлива маневровыми тепловозами / Дис... канд. техн. наук. — М.: ВНИИЖТ, 2011. — 186 с. ●

Координаты автора: **Калугин С. П.** – SPK_111@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 28.11.2014, принята к публикации 19.03.2015.

Статья подготовлена на основе материалов, представленных авторами на Международной научно-практической конференции «Конструкция, динамика и прочность подвижного состава», посвященной 75-летию со дня рождения В. Д. Хусидова (МИИТ, 20-21 марта 2014 года).



ECONOMIC CHOICE OF PARAMETERS OF HYBRID LOCOMOTIVES' POWER PLANT

Kalugin, Sergey P., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

ABSTRACT

The article is devoted to the choice of parameters of hybrid locomotive's power plant (primary source power and energy storage capacity) by the criterion of maximum economic efficiency. Since it is the use of energy

storage device having a high market value, stimulates the search for rational costs for equipment, study the possibility to provide the most favorable ratio of performance, including through the analysis of development and consumption of energy by a diesel engine.

Keywords: autonomous transport, locomotive, hybrid power plant, energy storage, value, costs, cost-effectiveness, optimization of parameters.

Background. In many countries the railways have started operation of a new type of autonomous locomotives – with a hybrid power plant (hybrid locomotives). Their peculiarity is the application of energy storage together with its primary source. However, the introduction of this advanced technology is constrained by the uncertainty of the economic effect – a very important factor in view of the high cost of energy storage.

Application of capacious enough energy storage in a power circuit allows the primary source to work in the most energy-efficient mode, if necessary (driving on a long ascent) locomotive is able to develop the capacity of more than nominal. When braking, again a return of energy to the energy storage is provided. In all cases, it allows to reduce the proportion of time of transients in the diesel engine.

Analysis of adverse effects of transients in power plants of locomotives on their performance have been considered in a number of works, in particular [1], which states that the most effective way to facilitate transients and reduce their share in the time of the diesel's work is the application of energy storages.

This article gives an analysis of the impact of relations of parameters of the power plant and operating conditions on the economic effect due to the introduction of a new locomotive. The analysis is based on studying diagrams of generation and energy consumption in the vehicle, which distinguishes it from statistical methods (for example, discussed in [2]).

Objective. The objective of the author is to analyze economic choice of parameters of hybrid locomotives' power plant.

Methods. The author uses general scientific methods, construction of diagrams, comparative analysis.

Results. Pic. 1 shows a diagram constructed according to [3]. Initial data are taken from [4]. The essence of the diagram is as follows. Two slanted lines depict energy production. If the energy storage at the beginning of the work is completely discharged, then from the origin comes a top straight line. If it is fully charged the bottom line comes from the origin point. Inclination of lines is directly related to the primary source power, and the distance between them is energy storage capacity. Curve (or broken line) shows energy consumption of a vehicle and integral with respect to the dependence of power consumed by traction motors, time (cyclogram of operating modes). The slope of energy consumption curve, smaller than inclination of straight lines means that the part of it enters the storage. At long stop (lack of energy consumption) curve runs horizontally and can touch the bottom line, indicating a full charge of energy storage. To prevent overcharging in such a situation, the primary source of energy should be trans-

ferred to idle or faded. Touching the curve of energy consumption and the top line means the depletion of the energy storage.

Energy consumption curve is constructed on the basis of calculation or on results of experimental trips, and necessary for a hybrid locomotive primary source power and storage capacity are determined by the construction of sloping corridor with minimum width and minimum inclination in which completely fits a consumption curve. A method of experimental obtaining data for construction of the energy consumption curve of shunting locomotives, described in detail in [5], is to measure free capacity of diesel generator plant by on-board system having current and voltage sensors, with every second recording of values during the shift. Simple mathematical processing of data allows obtaining the desired curve.

Mathematical method for constructing such a corridor is a linear approximation in the Chebyshev norm (even linear approximation). Graphic solution using navigational line is also possible.

The main parameters that determine feasibility of creating hybrid power plants are:

- Specific mass and volumetric capacity of primary source;
- Specific mass and bulk storage capacity;
- The cost of primary source and storage;
- The economic effect of the storage's use;
- The life time of primary source and storage.

The dependence of the storage resource on the depth of discharge can be considered by empirical coefficients.

The first condition for the creation of hybrid installation is the possibility of placing a primary source of energy and energy storage on the vehicle; condition is the system of inequalities:

$$\begin{cases} \frac{N}{n_v} + \frac{E}{e_v} \leq V, \\ \frac{N}{n_m} + \frac{E}{e_m} \leq m, \end{cases} \quad (1)$$

where N is power of the primary energy source, kW;

E is storage capacity, kW·h;

n_v is specific volumetric capacity, taken considering technological spaces (for maintenance, diagnostics etc.), kW/cub. m.;

e_v is specific volumetric capacity of storage, kW*h/cub.m.;

V is volume of the engine room of the vehicle, cub. m.;

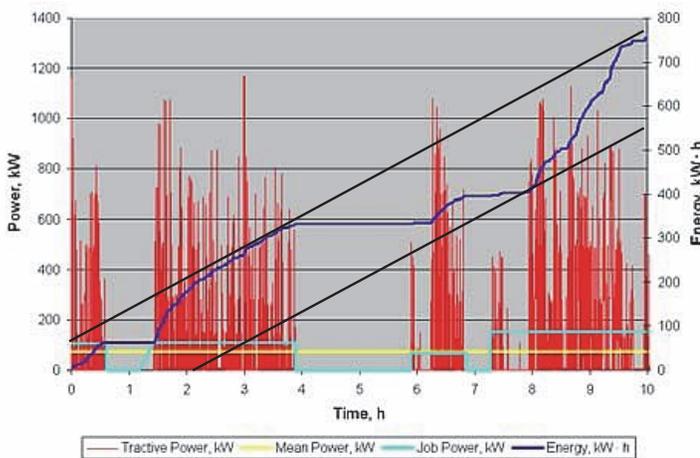
n_m is specific mass power, kW/kg;

e_m is specific mass capacity, kW·h/kg;

m is maximum permissible weight of the hybrid power plant, limited for diesel locomotives by permissible axle load on a rail.

Table 1

Type of equipment	Specific parameters		Life time
	mass	volumetric	
Primary sources	W/kg	W/l	years
Diesel generators			
PD1M	40,5	42,4	9,0
2A-5D49	113	77,8	9,0
211D-2	101	73,2	3,5 (30 th. h.)
Fuel elements			
HD6 (Ballard) – PEMFC	214	113,6	no data
Photon (UEHK) – SHTE	62,5	37,3	0,5 (5000 h.)
Storages	W · h/kg	W · h/l	cycles (years)
Accumulators			
FNC A XR (Brilon)	19,6	-	no data
Plumbic 52PzS-350P	29,4	67	8 years
Lithium-ion (Liotech) LT-LYT300	103	99	3000 (3 years)
Lithium-polymeric (Kokam)	141	220	600 (2 years)
Lithium-ion (tram)	54,5	-	1000
Ni-MH (Toyota)	35	-	1000
Super capacitors			
BMOD0063-P125 Maxwell	2,4	1,4	over 10 ⁶
30ЭK502 «Elton»	1,9	2,3	over 10 ⁶
30ЭK404 «Elton»	2,6	3,6	over 10 ⁶



Pic. 1. Diagram of energy generation and consumption in the vehicle. Storage capacity is large (capacity of the power plant is constant).

In a first approximation of equation (1) the weight of the fuel tank with fuel is not taken into account, which is usually a few times less than the weight of the diesel-generator plant, and therefore not limiting power available per a locomotive.

Typical values of these parameters for modern primary energy sources and storages are shown in Table 1.

The objective function, under the assumption that the gain is proportional to both the primary source power and storage capacity, has a form:

$$F = \alpha \cdot N + \beta \cdot E \rightarrow \max. \quad (2)$$

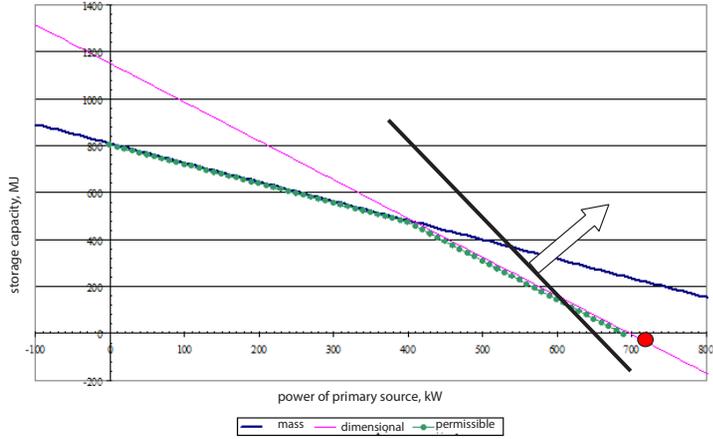
Coefficients α and β in the expression (2) are equal to the difference between the costs for the corresponding node, related to its life time, and particular economic benefit from the work of the node, re-

ferred to a unit of its characteristics (in this case – power or capacity), with dimensions rub. / (kW · year) and rub. / (MJ · year). Lines of equal profit, so will be represented by inclined lines, and the maximum of the functional (2) reflect the maximum removal of the equal income line from the origin. In general, this line is a curve, which may even be non-monotonic, and there can be several optimum points. The character of equal profit line requires a separate study.

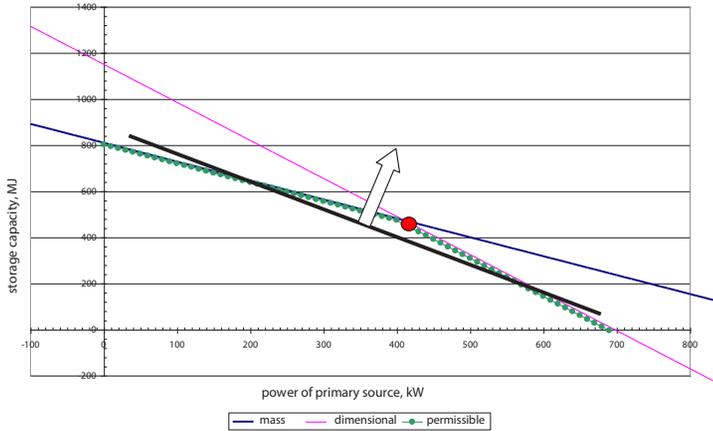
A graphical representation of the inequalities (1) and functional (2) is shown in Pic. 2-5. Performed calculations show that for the majority of modern primary sources and energy storage constraints form a convex region as shown in Pic. 3.

The formulated task relates to the well-known class of linear programming problems, but the linearity of

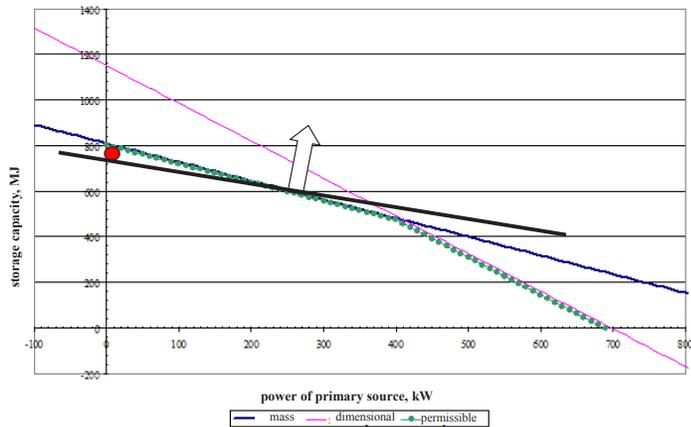




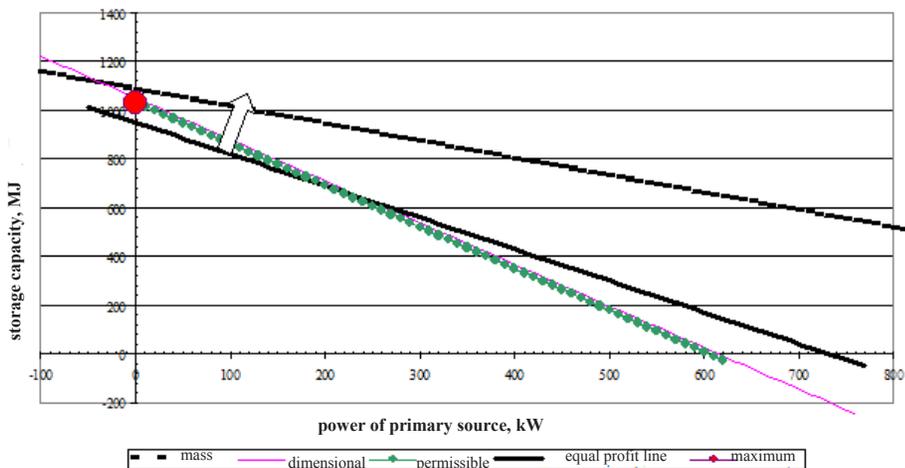
Pic. 2. Defining the parameters of the power plant, providing maximum profit. The first situation: storage is very expensive, the maximum profit is provided by primary energy source.



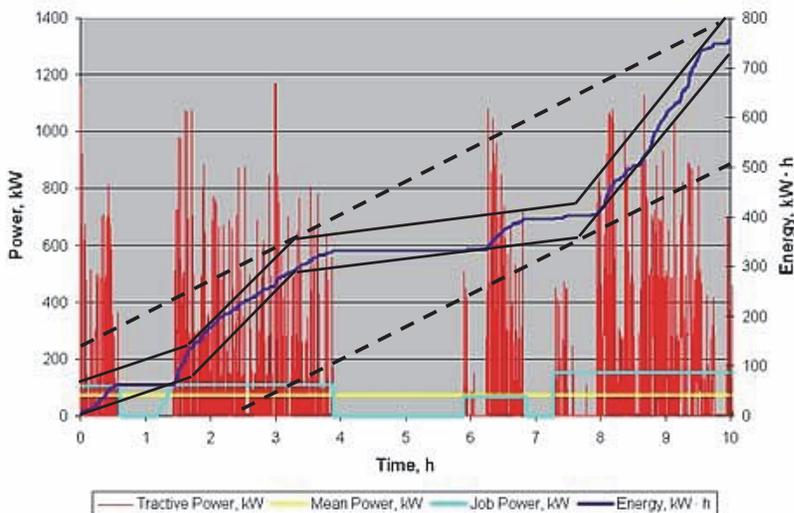
Pic. 3. Defining the parameters of the power plant, providing maximum profit. The second situation: the maximum profit is provided by the hybrid plant.



Pic. 4. Defining the parameters of the power plant, providing maximum profit. The third situation: storage is cheap, the maximum profit is achieved by a new plant (accumulator, capacitor or flywheel energy store).



Pic. 5. Defining the parameters of the power plant, providing maximum profit. The point of intersection is in the negative power region of the primary source.



Pic. 6. The diagram of generation and consumption of energy in the vehicle. Two energy storage devices are marked («broken corridor» shows work of supercapacitor).

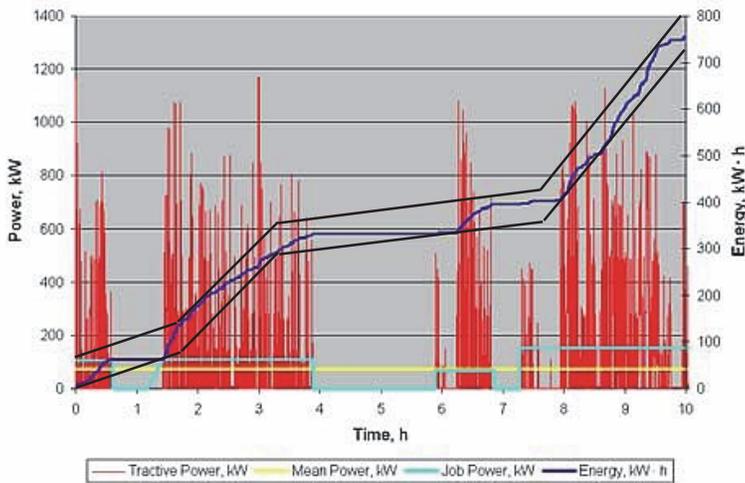
main dependencies in determining cost-effective parameters of hybrid plants serves only as a simplifying hypothesis. In fact, in the inequalities (1) specific parameters will be constant only for chemical current sources, and specific indicators of internal combustion engines (and electric machines) are dependent on the nominal power; this dependence is known in engineering as a scale factor. Specific indicators of chemical current sources are determined by the electrochemical system (i.e., properties of fuel and oxidizer, the equation of current-producing reactions, etc.) and thus are free from the influence of the scale factor.

As can be seen from Pic. 3, there is an optimal combination of specific parameters of the primary source and the storage corresponding to the combination of their capacity and power as defined in the diagram of generation and consumption of energy for traction (Pic. 1). From options shown in Pic. 2-5 it can be seen which parameter of the hybrid power plant should be improved. In addition, the analysis of variants having optimum does not preclude such a predic-

tion: when the economic feasibility of the creation of hybrid plants relatively small improvement in performance of the storage makes non-use of primary sources and the transition to electric vehicles economically sound.

It is known that one storage cannot simultaneously satisfy both requirements – capacity and intensity of charge and discharge (input and output of power). The solution is to use two storages. One of them (usually battery) has a large capacity but cannot be charged and discharged rapidly (more precisely, it can, but with a significant decrease in efficiency and lifetime). Another (usually supercapacitor) has a low capacitance (10-100 times less), but can be charged and discharged almost instantaneously, without prejudice to the efficiency and service life. There is a problem of determining the optimal breakdown of the total capacity between two storages, the solution of which is to build an «enclosed corridor» in the diagram of generation and consumption of energy (Pic. 6). Capacity of





Pic. 7. The diagram of generation and consumption of energy in the vehicle. Storage capacity is small (capacity of the power plant has to be changed).

two different storage is associated with additional restriction:

$$N_{max} \leq (E_s - E_{cr}) \cdot n_e + N_{nu} \quad (3)$$

where N_{max} is a slope of the most abrupt section of a «broken corridor», i.e. the maximum power passing through a circuit (supercapacitor + traction motor) – (battery + primary source), kW;

E_s is total capacity of the storage (both storages), defined by Pic.2, i.e. the width of a dotted corridor in Pic. 6, MJ;

E_{cr} is capacity of super capacitor, i.e. the width of a «broken corridor» in Pic. 6, MJ;

n_e is specific output of battery's power, i.e. maximum power delivered by the battery of a given capacity by a criterion of efficiency or life time, kW/MJ;

N_{ps} is primary source power, kW.

Power equipment of three different types (diesel generator set, supercapacitor, battery) is described by the system of inequalities with three variables. Accordingly, a task of the type shown in Pic. 2 should be decided on a three-dimensional polyhedron.

If storage capacity determined from Pic. 1, is superior to permissible by limits of the system of inequalities (1), then the primary source power (diesel) has to be changed; a step change in its power will be displayed in the diagram of generation and consumption of energy in the form of fractures of the corridor formed by the lines of overcharge and depletion of the storage (Pic. 7). As can be seen, necessary storage capacity reduces greatly.

Conclusions. Matching the power of the primary energy source and storage capacity, expressed in Pic. 1 and 6, allows to achieve maximum economic efficiency of the hybrid locomotive. However, the use of the power plant on it, not optimized for the operating conditions, leads to a significant reduction of economic effect: according to [2], the difference may be up to 20 th. euro / year.

These findings do not account for fuel properties and methods for its storage in the characteristics of the primary sources of energy. In those cases, then fuel parameters are limiting fuel (gas locomotives), they will need to be taken into account.

REFERENCES

1. Nikipeliy, S. O. Improving the efficiency of diesel locomotives in the application of energy storage in the power circuit. Ph.D. (Eng.) thesis [Povyshenie effektivnosti raboty teplovozov pri primenenii nakopitelja energii v silovoj cepi. Dis... kand.tehn.nauk]. Moscow, MIIT publ., 2011, 167 p.
2. Jaafar, A., Sareni, B., Roboam, X. A Systemic Approach Integrating Driving Cycles for the Design of Hybrid Locomotives. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, 2013, Iss. 8, pp. 3541–3550.
3. Belyaev, A. S., Zuev, G. V., Kalugin, S. P. The method of selecting parameters of the power equipment of hybrid fuel cell locomotives [Metod vybora parametrov silovogo oborudovanija gibridnyh lokomotivov na toplivnyh elementah]. *Proceedings of the scientific-practical conference «Science Week 2009»*. In 2 parts. Part 1. Moscow, MIIT, 2009, pp. 1–11.
4. Miller, A. R., Erickson, T. L., Dippo, J. L., Eisele, R. I., Johnson, M. D., Lambrecht, T. Hydrogen fuel-cell locomotive: switching and power-to-grid demonstrations. *Proceedings of World Congress on Railway Research*, Lille, France, 22–26 May 2011.
5. Popov, K. M. Selection and justification of the parameters of the automated adaptable to operation conditions system of accounting and analysis of fuel consumption by shunting locomotives. Ph.D. (Eng.) thesis [Vybor i obosnovanie parametrov avtomatizirovannoj adaptiruemoj k uslovijam ekspluatcii sistemy ucheta i analiza rashoda topliva manevrovymi teplovozami. Dis... kand. tehn. nauk]. Moscow, VNIIZhT publ., 2011, 186 p.

Information about the author:

Kalugin, Sergey P. – Ph.D. (Eng.), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, SPK_111@bk.ru.

Article received 28.11.2014, accepted 19.03.2015.

The article is based on the papers, presented by the authors at the International scientific and practical conference «Rolling stock's Design, Dynamics and Strength», dedicated to the 75th anniversary of V. D. Husidov, held in MIIT University (March, 20–21, 2014).



РЕГИОНЫ 138

Северный сценарий наземных маршрутов.

АВТОМАТИЗАЦИЯ 154

Алгоритмы графиков оборота подвижного состава.

ПЕШЕХОДНЫЙ ПОТОК 166

Уйти от конфликта помогает организация движения.

ТРАНЗИТ 174

В роли интегратора транспортных систем.

АВТОВЕЛОБУС 190

Велосипедизация по-вьетнамски.

ЕАЭС 200

Казахстанские коридоры.



ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ • ADMINISTRATION, MANAGEMENT AND CONTROL



REGIONS 138

Northern scenario of land routes.

AUTOMATION 154

Algorithms of schedules of turnover of the rolling stock.

PEDESTRIAN FLOW 166

Traffic organization helps to avoid conflicts.

TRANSIT 174

How the transit integrates transportation systems.

BICYCLE-BUS 190

Extent of bicycle use has generated new transportation service in Vietnam.



EURASIAN ECONOMIC UNION 200

Kazakhstan's transport corridors.