

Модульный состав – экономия энергии



Игорь АЛЕКСАНДРОВ

Igor S. ALEXANDROV

В статье представлен сопоставительный анализ традиционной и модульной схем грузового железнодорожного поезда. Обоснованы существенные преимущества и перспективность модульной технологии. Показаны ограничения на использование супермощных локомотивов и сделана предварительная оценка рисков их сравнительной энергетической и экономической неэффективности.

Ключевые слова: железная дорога, грузовой поезд, подвижной состав, модульная схема, газотурбовоз.

Александров Игорь Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности и промышленной экологии Вологодского государственного университета, Вологда, Россия.

Существующая теория локомотивной тяги [1] рассматривает движение поезда, являющегося системой материальных тел (локомотив и состав вагонов), как движение материальной точки, в которой сосредоточена вся масса поезда. Эта весьма упрощенная математическая модель позволила применить для анализа поступательного движения поезда закономерности, установленные Ньютоном. При этом, естественно, автоматически игнорируются энергетические процессы в самой системе материальных тел. В частности, не принимаются во внимание фрикционные потери в сцепном устройстве и других элементах, участвующих в передаче потока мощности от локомотива к колесным парам, что противоречит законам науки трибологии.

Нами предложен принципиально иной подход к выполнению тягового расчета, когда поезд представляется в виде последовательно-параллельной кинематической цепи (КЦ). Причем сразу однозначно определяется наиболее эффективный ее вариант.

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ

В качестве альтернативы традиционной схеме железнодорожного состава с головным

локомотивом (рис. 1а) рассматривается построение, где кинематические связи существенно упрощены и частично заменены электрическими (рис. 1б). Назовём такую схему железнодорожного состава модульной. Модуль представляет собой комплексную единицу подвижного состава с тяговым вагоном, к которому подсоединяются один или несколько обычных (неприводных) вагонов.

В соответствии с методикой составления блок-схем [2] введено понятие собирательное звено (СЗ). Это такой элемент КЦ, который объединяет (собирает) несколько потоков мощности. Каждое СЗ маркируется по уровню удаления его от энергетической установки (ЭУ) и ему присуждается порядковый номер на данном уровне. Звенья соединяются между собой внутренними КЦ. От любого СЗ могут отходить внешние кинематические цепи, которые заканчиваются рабочим органом, непосредственно совершающим полезную работу. В данном случае таким «рабочим органом» становится колёсная пара. Следовательно, применительно к схеме железнодорожного состава: СЗ 1-го уровня – система сцепных устройств поезда (цепка); СЗ 2-го уровня – вагоны; СЗ 3-го уровня – вагонные тележки, которые объединяют колёсные пары.

Из представленных блок-схем очевидно, что энергоэффективность КЦ модуля всегда выше, чем КЦ поезда с локомотивом, так как в последнем случае используется значительно большее количество внутренних КЦ, каждая из которых создаёт дополнительные энергетические потери. Это увеличение внутренних КЦ определяется особенностью конструктивного вида сцепного устройства (СУ) поезда с головным локомотивом

Для оценки энергоэффективности СУ удобно использовать условную тяговую единицу (Т.Е.) измерения. Она есть безразмерная величина, символизирующая значение тягового усилия, необходимого для транспортирования одного гружёного вагона с заданной скоростью по горизонтальному участку пути с учётом потерь на перекатывание колёсных пар по рельсу, в подшипниках колёсных пар, подрессоренной вагонной тележке, а также аэродинамического сопротивления.

На рис. 2а показан традиционный состав с локомотивом из 60 вагонов и пред-

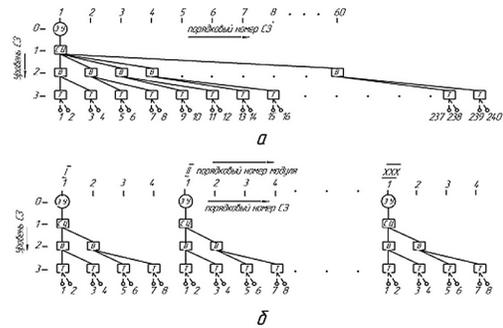


Рис. 1. Блок-схема кинематической цепи: а – поезд с локомотивом; б – поезд, составленный из двухвагонных модулей.

ставлено изменение тягового усилия (определяемое в Т.Е.), возникающего в сцепке между вагонами, которое пропорционально возрастает по мере приближения вагона к локомотиву.

На рис 2б изображены те же показатели применительно к составу из 60 вагонов, но сформированному из трёхвагонных модулей.

Уже из беглого сопоставления представленных схем очевидны преимущества последней (модульной) КЦ: 1) в модульной схеме значительная часть внутренних КЦ заменена электрическими связями за счёт прямого соединения ЭУ тягового вагона с контактной сетью; 2) каждый «тяговый» вагон перемещение самого себя осуществляет самостоятельно, без использования сцепного устройства; 3) в сцепке между модулями тоже отсутствует тяговое усилие; 4) максимальное тяговое усилие в модуле – всего 2 Т.Е., тогда как усилие, передаваемое на первый вагон поезда с локомотивом, составляет 60 Т.Е.

Три первых условия обеспечивают снижение энергопотребления модульным поездом за счёт уменьшения непроизводительных потерь в сцепном устройстве. Четвёртое условие принципиально меняет требования к конструкции вагона. Дело в том, что разрывное усилие, а соответственно и ударная нагрузка, передаваемая на нижнюю раму первого вагона (а в составе с локомотивом любой вагон может оказаться первым) в 30 раз больше, чем максимальное значение этого усилия в модуле! Следовательно, может быть существенно уменьшена металлоёмкость нижней рамы модульного вагона, воспринимающей по-





Таблица 1

Влияние числа вагонов в модуле на коэффициент снижения нагрузки на сцепное устройство и величину фрикционных потерь в сцепке в составе из 60 вагонов при $\eta_{сц} = 0,99$

Количество вагонов в модуле, <i>n</i>	Количество вагонов в составе, <i>N</i>	Количество тяговых единиц в модуле, <i>z</i>	Коэффициент снижения нагрузки на сцепное устройство, <i>K_{сн}</i>	Фрикционные потери в сцепке поезда с локомотивом, $(1 - \eta_{сц}) \cdot T_{л}$ Т.Е.	Фрикционные потери в сцепке модульного поезда, $(1 - \eta_{сц}) \cdot T_{м}$ Т.Е.
2	60	1	61	18,3	0,3
3	60	3	30,2	18,3	0,6
4	60	6	20,3	18,3	0,9
5	60	10	15,3	18,3	1,2
6	60	15	12,2	18,3	1,5

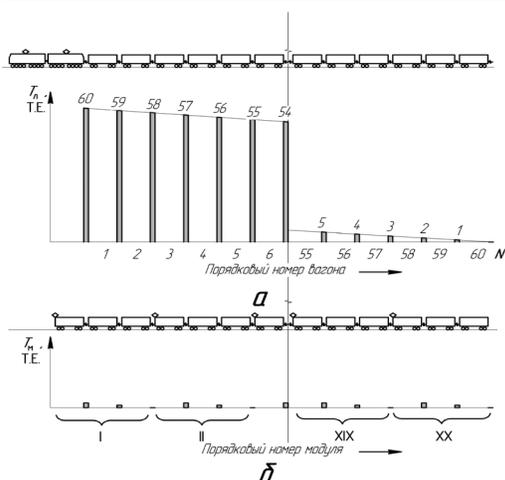


Рис. 2. Изменение тягового усилия (определяемого в условных тяговых единицах) в сцепке между вагонами: а – поезд с локомотивом; б – поезд, составленный из трёхвагонных модулей.

ниженное разрывное (ударное) усилие, что позволит пропорционально увеличить массу перевозимого вагоном груза (нетто).

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Для ориентировочного энергетического анализа используем экспресс-метод.

Проанализируем эффект снижения энергоёмкости СУ за счет уменьшения усилий, действующих в нем, при наличии модульной схемы. Суммарное количество $T_{л}$ тяговых единиц, передаваемое через СУ поезда с локомотивом, определяется зависимостью:

$$T_{л} = \frac{N(N+1)}{2}, \text{ Т.Е.}, \quad (1)$$

где N – количество вагонов в составе, шт.

Суммарное количество $T_{м}$ тяговых единиц, передаваемого через СУ поезда модульного типа, дает формула:

$$T_{м} = \frac{N}{n} \cdot Z, \text{ Т.Е.} \quad (2)$$

где n – количество вагонов в модуле; Z – суммарное количество тяговых единиц в модуле, Т.Е.

Дискретная функция $Z = f(n)$ определяется соотношением $Z_{i+1} = Z_i + n_i$.

В первом приближении энергетическую эффективность от применения модульной схемы можно оценить коэффициентом $K_{сн}$ снижения нагрузки на сцепное устройство

$$K_{сн} = \frac{T_{л}}{T_{м}} = \frac{n(N+1)}{2Z}. \quad (3)$$

Чтобы определить величину фрикционных потерь в сцепке поезда, надо экспериментально установить КПД ($\eta_{сц}$) сцепного устройства. Соответственно получаем два выражения:

а) для сцепного устройства с локомотивом $T_{фрл} = (1 - \eta_{сц}) \cdot T_{л}$, Т.Е. (4)

б) для сцепного устройства с модулем $T_{фрм} = (1 - \eta_{сц}) \cdot T_{м}$, Т.Е. (5)

Автор не имел возможности провести натурные исследования и зафиксировать фрикционные потери в сцепном устройстве поезда. Поэтому при проведении расчетов примем за основу минимальную величину относительных фрикционных потерь для элемента КЦ. Согласно курсу «Детали машин», такой величиной обладает шарикоподшипник, имеющий КПД 0,99. Допустим, что СУ вагонов настолько совершенно, что обеспечивает аналогичную энергетическую эффективность.

Таблица 2

Зависимость коэффициента энергетической эффективности сцепного устройства поезда от числа вагонов в модуле при $\eta_{сц} = 0,99$

Варианты комплектации состава	Поезд: локомотив+ 60 вагонов	2-вагонный Модуль	3-вагонный Модуль	4-вагонный модуль	5-вагонный модуль	6-вагонный модуль
КЭЭ	0,766	0,995	0,99	0,985	0,98	0,975

В таблице 1 показано влияние числа вагонов в модуле на коэффициент снижения нагрузки на СУ и величину фрикционных потерь в сцепке с учётом общего количества вагонов в составе.

В рамках упрощённого экспресс-метода сопоставительный анализ может быть представлен также в виде интегрального критерия, названного нами коэффициентом энергетической эффективности (КЭЭ) сцепного устройства, который достаточно близок к значению КПД СУ. За величину полезной работы, совершаемой ЭУ, принимаем тяговое усилие, необходимое для транспортирования всех вагонов поезда. Численно оно равно количеству вагонов в поезде, умноженному на условную тяговую единицу: $T_{пол} = N \times 1$, Т. Е. За величину непроизводительных потерь принимаем фрикционные потери в сцепке поезда. Тогда по аналогии с понятием КПД предложенный критерий для СУ поезда с локомотивом определится по выражению:

$$\begin{aligned}
 KЭЭ_{л} &= \frac{T_{пол}}{T_{пол} + T_{фр}} = \frac{N}{N + (1 - \eta_{сц})T_{л}} = \\
 &= \frac{1}{1 + (1 - \eta_{сц})\frac{N + 1}{2}}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Соответственно коэффициент энергетической эффективности СУ для поезда, скомплектованного из модулей:

$$\begin{aligned}
 KЭЭ_{м} &= \frac{N}{N + (1 - \eta_{сц})T_{м}} = \\
 &= \frac{N}{N + (1 - \eta_{сц})\frac{N}{n}Z} = \\
 &= \frac{1}{1 + (1 - \eta_{сц})\frac{Z}{n}}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Формула (7) позволяет убедиться в том, что КПД КЦ модульного состава не зависит от количества вагонов в поезде.

В таблице 2 приведены результаты расчёта КЭЭ для различных вариантов

комплектаций состава при условии $\eta_{сц} = 0,99$.

На первый взгляд, очевидно энергетическое преимущество двухвагонного модуля. Однако решение по выбору оптимального вида модуля может быть принято только на основе экономического обоснования с учетом технологии комплектования, энергоснабжения и обслуживания грузового поезда. Что потребует серьёзного комплексного исследования и оценки с привлечением специалистов разного профиля.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

Бесспорное преимущество модульной схемы заключается в существенном повышении эксплуатационного КПД ЭУ поезда.

Любой локомотив имеет вполне определённую (конечную) установленную мощность, которая реализуется на 100% только при условии транспортирования большегрузного поезда, что в реальных условиях эксплуатации подвижного состава бывает далеко не всегда. Зачастую энергетическая установка локомотива оказывается недогруженной, и пропорционально снижению нагрузки на локомотив уменьшается его эксплуатационный КПД, который достигает нулевого значения при холостом перегоне. Модульная схема этот недостаток автоматически исключает, ибо суммарная установленная мощность всех тяговых вагонов не является фиксированной величиной, а определяется прямо пропорционально количеству вагонов в составе. Таким образом, эксплуатационный КПД модульного состава независимо от его (состава) общей грузоподъемности стабильно остается равным единице.

Опять же по причине отсутствия фиксированной суммарной установленной мощности ЭУ можно комплектовать модульный состав любой желаемой грузоподъемности. В энергетическом отноше-





нии суммарная мощность ЭУ поезда ограничивается только максимальной электрической мощностью контактной сети.

И еще. При формировании модульного супертяжеловесного состава исключается локомотив, имеющий массу до 300 т и создающий динамическую сосредоточенную нагрузку, разрушающую железнодорожные мосты, пути и окружающие строения

Однако следует признать, что реализация моторвагонной схемы (рис. 2б) представляет значительную техническую сложность ввиду наличия большого числа потребителей электрической энергии в составе поезда. Тем не менее моторвагонная схема всё же получила развитие на пассажирских электропоездах, и накоплен огромный опыт по ее эксплуатации. В связи с этим, по мнению автора, все же не следует абсолютно категорично отвергать возможность применения в перспективе моторвагонной схемы для грузовых поездов. На первом этапе внедрения модульной схемы грузовых перевозок представляется более рациональной комплектация модуля как самостоятельной секции с головной энергоустановкой (ГЭУ) в виде электровоза малой (или средней) мощности. Это позволит достаточно оперативно осуществить реализацию модульной технологии на основе существующего парка электровозов. Но при разработке секции необходимо непременно соблюсти следующее требование: сила сцепления с полотном дороги и энергетические характеристики ГЭУ должны обеспечивать электродинамическое торможение модуля. Такой результат может быть достигнут подбором соответствующего параметрам ГЭУ количества вагонов. Тогда за счёт электродинамического торможения будут обеспечены преобразование кинетической энергии модуля (а соответственно и поезда в целом) в электрическую и рекуперация последней в контактную сеть постоянного тока.

ТОРМОЗНАЯ СИСТЕМА МОДУЛЬНОГО ПОЕЗДА

В отличие от модульной схемы рекуперация кинетической энергии тяжеловесного состава вкупе с головным локомотивом не может быть реализована в первую очередь из-за недостаточности сил сцепления локомотива с железнодорожным полотном. Поэтому остановка традиционного грузо-

вого поезда производится исключительно механической системой торможения вагонов состава.

В этом отношении хотелось бы обратить внимание разработчиков электрооборудования [3] на то, что процесс торможения поезда в разы более скоротечен, чем процесс его разгона, а инерционные силы, как известно, определяются величиной ускорения. И простейшим расчетом можно показать, что силы инерции, возникающие при торможении супертяжелого поезда, многократно превышают силы сцепления головного локомотива с железнодорожным полотном, а значит, электродинамическое торможение в данном случае не может быть реализовано в принципе по законам физики.

Тормозить состав за счет головного локомотива нельзя и по условиям безопасности движения, поскольку при таком торможении (особенно если двигаться по кривой) поезд может потерять продольную устойчивость.

Модульная схема указанные недостатки полностью исключает. Во-первых, как было отмечалось, создание модуля ставит цель четко увязать допустимую суммарную массу вагонов со сцепными свойствами энергетического блока; а во-вторых, модульный принцип дает возможность при торможении управлять процессом стабилизации продольной устойчивости всего поезда. Для этой цели, видимо, рационально будет энергетический блок последнего модуля разместить ближе к хвостовой части состава. И именно с хвоста поезда начинать управляемый процесс электродинамического торможения.

Укажем, что супердлинный состав, ведомый головным локомотивом, реально имеет очень серьезную проблему при торможении по причине потери продольной устойчивости поезда. В результате чего существенно увеличивается тормозной путь и снижается производительность перевозочного процесса. В связи с этим разрабатываются специальные сложные системы управления тормозами (СУПТ) (см. подробнее [4]).

Дело в том, что при прямом включении тормозной системы поезда непосредственно из головного локомотива не происходит мгновенное падение давления сразу во всей

тормозной магистрали поезда. То есть сначала обеспечивается торможение локомотива и передних вагонов и только со значительным запаздыванием это происходит со средними и хвостовыми, инерционные силы которых «наваливаются» на тормоза локомотива и передних вагонов, и возникает высокая вероятность разрыва и опрокидывания состава. Это явление сразу же проявилось на тяжеловесных поездах [4,5]. Поэтому для надежного и безопасного торможения на них стали устанавливать дополнительный локомотив с машинистом для управления тормозами (!)

УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ

Ранее в качестве интегрального критерия был взят КЭЭ, который позволил использовать упрощённую (экспрессную) методику сопоставительного анализа и определить тенденции энергетической эффективности моторвагонной схемы формирования железнодорожного состава в сравнении с традиционной. Этот приближенный показатель приемлем для анализа коротких КЦ, но при увеличении их длины достоверность КЭЭ существенно снижается. Представим более строгое доказательство зависимости, определяющей энергетические потери в сцепном устройстве поезда.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями [2,6,7] установлено, что в последовательной кинематической цепи имеет место нелинейное нарастание фрикционных потерь. Эта нелинейность очень существенно проявляется при значительном увеличении длины КЦ. На рис. 3 изображена схема, по которой можно понять, как изменяется соотношение между усилием тяги, обеспечивающим работу по транспортированию вагонов, и суммарным усилием тяги на локомотиве с учётом непроизводительных (фрикционных) потерь в сцепке.

Усилие тяги, необходимое для транспортирования N вагонов, будем считать показателем полезной работы, выполняемой локомотивом: $T_{пол} = N \times 1$, т. е. Поэтому в расчётах принимаем условие:

$$T_{пол} = N. \quad (8)$$

Суммарное тяговое усилие T_{Σ} на локомотиве определяется суммой усилий T_i

на транспортирование каждого (i -го) вагона с учётом фрикционных потерь, возникающих в сцепном устройстве под действием этого (i -го) усилия при передаче его по данному элементу кинематической цепи. Беря во внимание понятие T_i и принимая величину $\eta_{сц}$ в качестве КПД сцепного устройства, запишем зависимость для нахождения суммарного тягового усилия на локомотиве:

$$\begin{aligned} T_{\Sigma} &= T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_i + \dots + T_N = \\ &= \frac{1}{\eta_{сц}} + \frac{1}{\eta_{сц}^2} + \frac{1}{\eta_{сц}^3} + \dots + \frac{1}{\eta_{сц}^i} + \dots + \frac{1}{\eta_{сц}^N} = \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{\eta_{сц}^i} \end{aligned} \quad (9)$$

На основе зависимостей (8) и (9) определяем КПД сцепного устройства поезда

$$\eta_{л} = \frac{N}{T_{\Sigma}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\eta_{сц}^i}}. \quad (10)$$

В таблице 3 и на рис. 4 приведены результаты энергетического расчёта сцепного устройства грузового поезда, проведённого на основе зависимостей (9), (10).

Рассматриваемая КЦ энергетически иррациональна: увеличение тягового усилия и соответственно количества транспортируемых вагонов приводит к снижению КПД сцепного устройства поезда. Следовательно, значительная часть энергии локомотива затрачивается на преодоление непроизводительных потерь в сцепном устройстве. Возникает парадокс: чем больше мощность энергетической установки, тем большее количество вагонов в составе требуется для реализации этой мощности и тем ниже становится энергетическая эффективность удлиняющейся КЦ.

ОГРАНИЧЕНИЯ ДЛЯ СУПЕРМОЩНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

Допустим, что дальнейшее развитие тяжеловесных поездов будет продолжаться путем установки впереди состава локомотива все большей и большей мощности. В конечном итоге это неизбежно приведет не только к указанному уже снижению энергоэффективности грузовых поездов, но к увеличению вероятности их растяжки и превышению допустимой величины сцепления колесных пар ло-



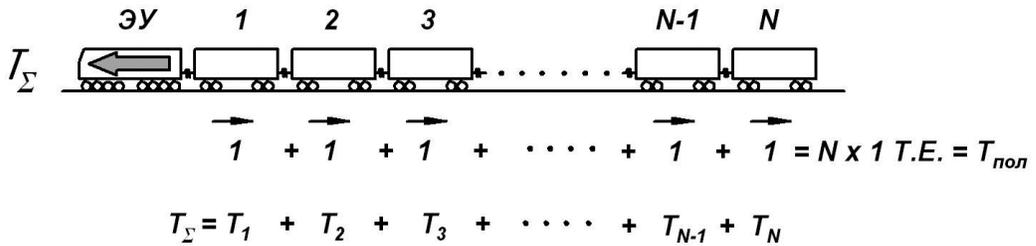


Рис. 3. К определению $T_{пол}$ и T_{Σ} .

комотива, а также к элементарному обрыву сцепного устройства или деформации нижней рамы первых вагонов поезда, которые рассчитаны на определенное значение растягивающих и ударных нагрузок.

Развитие же тяжеловесных составов на основе модульной технологии, как подчеркивалось, позволяет сохранить (или даже уменьшить) тяговую нагрузку на сцепное устройство в пределах допустимых значений и появляется возможность комплектовать состав любой (желаемой) грузоподъемности. Причем не вступая в противоречие с законами физики, определяющими коэффициент сцепления колесной пары с рельсом, и не увеличивая осевую нагрузку, секционную мощность и массу локомотива. То есть с учетом факторов, которые существенно понижают долговечность и надежность рельсовых путей.

И пока мы дискутируем по поводу целесообразности или абсурдности модульной технологии, австралийские железнодорожники уже используют супертяжеловесный модульный поезд, имеющий восемь локомотивов, равномерно распределенных по длине состава (иными словами, применяют восемь модулей) из 682 вагонов [8]! И это уже не фантазия, а реализованное техническое решение.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОТУРБОВОЗА ГТ 1-001

В России подготовлен к эксплуатации самый мощный в мире газотурбовоз ГТ 1-001 (установленная мощность 8300 кВт) [4]. Энер-

гетическая установка этого локомотива включает в себя газовую турбину, работающую на сжиженном природном газе (СПГ) и приводящую в действие электрогенератор, от которого электрическая энергия передается тяговым двигателям. По экспериментальным данным разработчиков, ГТ 1-001 обеспечивает тягу 170 вагонов. Однако, согласно представленной методике, нельзя рассчитывать на высокую энергетическую эффективность такого поезда (см. таблицу 3). К тому же при этом сохраняются и все отмеченные ранее недостатки, связанные с эксплуатацией сверхмощного локомотива.

На разработку газотурбовоза уже затрачена огромная сумма и потребуется еще немало государственных средств на создание для его эксплуатации инфраструктуры. На газотурбовозе применяется СПГ, разовая заправка которого дает запас хода поезда до 750 км. Следовательно, по всей магистрали, где будут использоваться газотурбовозы, надо установить заправочные станции. А это означает, что потребуется сеть газопроводов и соответствующее количество криогенных установок для сжижения природного газа. Известно, что процесс многоступенчатого сжатия газа с последующим сжижением весьма энергоемок. На эту процедуру затрачивается примерно 25% энергии, запасенной в самом сжиженном продукте. Примерно настолько же дополнительно снижается и энергоэффективность грузоперевозок с использованием турбовозов.

Таблица 3

Энергетические характеристики сцепного устройства грузового поезда при КПД $\eta_{сц} = 0,99$

Количество вагонов в составе	5	10	20	30	40	50	60	Газотурбовоз ГТ 1-001 170
Суммарное тяговое усилие, Т.Е.	5,15	10,57	22,26	35,19	49,48	65,29	82,76	452,1
КПД сцепного устройства	0,970	0,946	0,898	0,833	0,808	0,766	0,725	0,376

Итак, чтобы обеспечить подачу природного газа к магистрали, около нее нужны электростанции. Но ведь стационарная электростанция вполне может работать на обычном (а не сжиженном) газе. Естественно, возникает вопрос: нужны ли в данной ситуации, мягко говоря, не очень эффективные газотурбовозы, требующие именно СПГ?

Очевидно, что при наличии вблизи железной дороги природного газа напрашивается с позиции энергетической и особенно экономической целесообразности другое гораздо более выгодное решение:

1) стационарная электростанция, минуя процесс сжижения газа (т. е. экономя 25% его энергетического ресурса), вырабатывает электроэнергию;

2) этой электроэнергией запитывается обычная контактная сеть;

3) тягу поездов обеспечивают обычные электровозы, на которых отсутствуют взрывоопасная емкость с СПГ, газовая турбина и генераторная установка, и эти электровозы соответственно в разы дешевле газотурбовозов;

4) применяется модульная схема комплектования подвижного состава, дающая энергоэффективное транспортирование поездов любой грузоподъемности (в том числе и супертяжеловесных);

5) и наконец, эксплуатация стационарных энергетических установок: электростанции около 10 МВт всегда используются в составе ТЭЦ, поскольку в лучшем случае только 40% от сгорающего топлива превращается в электроэнергию, а остальная (тепловая) энергия идет на обогрев жилых и производственных зданий... А газотурбовоз? Он эту тепловую энергию будет выбрасывать как побочный продукт для «обогрева» бескрайних просторов страны.

Попутно отметим, что на сегодняшний день разработано немало технологий, обеспечивающих прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Это так называемые термоэлектропреобразователи (ТЭП) [9,10]. А значит, и в теплый период года электростанции до 40% процентов избыточного тепла могут превращать в электричество.

Стоит отметить и еще один весьма существенный недостаток газотурбовоза, который никак не следует сбрасывать

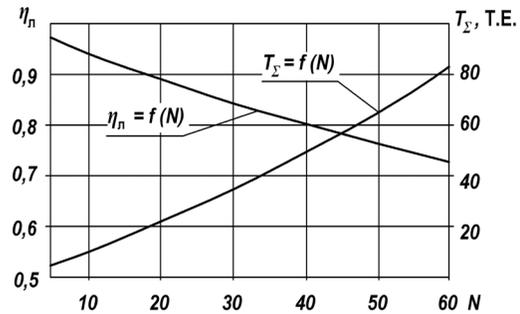


Рис. 4. Зависимости КПД ($\eta_{л}$) сцепного устройства поезда и тягового усилия ($T_{з}$) на локомотиве от количества (N) вагонов в составе.

со счетов — это его высокая опасность. В условиях динамических нагрузок возникает большая вероятность разгерметизации емкости со сжиженным газом и последующего взрыва образующейся при этом газозвоздушной смеси. Не исключена и аварийная ситуация по причине отказа АСУТ. Ведь поезд на тяге от турбовоза (в отличие от поезда модульного типа) не предполагается оборудовать дублирующей (ручной) системой торможения.

Запас СПГ на газотурбовозе составляет 17 т. При возгорании (взрыве) такого количества топлива выделяется приблизительно 1000 ГДж тепла, что сопоставимо с энергией газа, сгорающего при аварии на магистральном газопроводе.

ПОЕЗДА МОДУЛЬНОГО ТИПА С ЭЛЕКТРОВОЗОМ

В развитии удачного опыта австралийских железнодорожников вполне реально приступить к реализации модульной схемы комплектования тяжеловесного подвижного состава на основе существующей базы локомотивов.

В России уже имеется небольшой опыт комплектования тяжеловесного состава с использованием спарки двух локомотивов — другими словами, применяют четырехсекционный электровоз. Разделив секции, можно составить поезд из четырех модулей.

Сначала определим энергетические характеристики энергоустановки локомотива, обеспечивающего тягу тяжеловесного поезда, составленного из 120 груженых вагонов, по традиционной схеме.

Суммарное тяговое усилие $T_{з}$ головной энергоустановки:





$$T_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\eta_{CI}^i} = \sum_{i=1}^{120} \frac{1}{0,99^i} = 234,02, \text{ Т.Е.}$$

КПД сцепного устройства поезда с головным локомотивом:

$$\eta_{л} = \frac{N}{T_{\Sigma}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\eta_{CI}^i}} = \frac{120}{\sum_{i=1}^{120} \frac{1}{0,99^i}} = 0,51277.$$

Тяговое усилие энергоустановки (ЭУ) одного модуля:

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\eta_{CI}^i} = \sum_{i=1}^{30} \frac{1}{0,99^i} = 35,19, \text{ Т.Е.}$$

Суммарное тяговое усилие ЭУ модульного поезда: $T_{\Sigma M} = 4_{\Sigma} = 140,76, \text{ Т.Е.}$

КПД сцепного устройства модуля (оно же равно и КПД модульного поезда):

$$\eta_{M} = \frac{N}{T_{\Sigma}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\eta_{CI}^i}} = \frac{30}{\sum_{i=1}^{30} \frac{1}{0,99^i}} = 0,85252$$

Согласно выполненному расчету, энергетический выигрыш во втором варианте комплектования поезда при заданном КПД СУ составляет около 40%.

Как видим, данный метод исследований обладает достаточно высокой чувствительностью. Даже при наличии фрикционных потерь в СУ существенно менее одного процента (что вполне возможно) их удастся зафиксировать по изменению величины потребляемой из сети электрической мощности и на основании этого высчитать реальную величину η_{CI} (в процентном соотношении).

ВЫВОДЫ

— Очевидно, что существующая тенденция развития производительности грузовых железнодорожных перевозок за счет использования локомотивов увеличенной секционной мощности с повышенными осевыми

нагрузками имеет ограниченные перспективы и не обеспечит решение проблемы принципиального роста эффективности перевозочного процесса.

— Рекорд австралийских железнодорожников четко подтверждает адекватность представленных теоретических зависимостей, определяющих пользу от применения модульной схемы комплектования грузового поезда.

— На данный момент созрела настоятельная потребность в проведении натуральных экспериментальных исследований в отношении количественной оценки эффективности модульной технологии комплектования грузовых поездов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы. — М.: Транспорт. 1985. — 287 с.
2. Александров И. К. Энергетический анализ механизмов и машин. Теоретическое и экспериментальное обоснование принципов исследования и определения энергетических потерь в механизмах и машинах: Монография. — Вологда: ВоГТУ, 2012. — 244 с.
3. Мизинцев А.В., Ковтун А. В. Использование энергии торможения поезда как способ экономии ресурсов на железной дороге постоянного тока // Наука и транспорт. — 2012. — № 3. — С.34–35.
4. [Электронный ресурс]. URL: <http://venture-biz.ru>. Доступ 17.07.2013.
5. Курбасов А. С. Тяжеловесное движение грузовых поездов на российских железных дорогах: за и против // Наука и транспорт. — 2012. — № 3. — С.15–17.
6. Александров И. К. Энергетическая неэффективность разветвлённых кинематических цепей // Вестник машиностроения. — 2010. — № 4. — С.20–28.
7. Aleksandrov I. K. Energy Inefficiency of Branched Kinematic Chains // ISSN 1068–798X, Russian Engineering Research, 2010, Vol. 30, No4, pp. 335–342.
8. Книга рекордов Гиннеса [Электронный ресурс]. URL: <http://rekordy-ginnesa>. Доступ 17.07.2013.
9. Патент № 2378742 С1 РФ. Устройство для получения электрической энергии постоянного тока / И. К. Александров, Е. В. Несговоров, В. А. Раков — Заявлен 17.11.2008; опубл. 10.01.2010, Б.И. № 1.
10. Александров И. К., Раков В. А. Новый высокоэффективный вид источника энергии для электромобилей // Транспорт на альтернативном топливе. — 2011. — № 6 (24). — С.58–60. ●

MODULAR TRAIN: ENERGY SAVING

Alexandrov, Igor C. — D. Sc. (Tech), professor, head of the department of life safety and industrial ecology of Vologda state university, Vologda, Russia.

The article refers to comparative analysis of traditional and modular schemes of freight rail train. The author substantiates relative advantages and describes outlook for modular trains. The limits of using of super powerful locomotives are shown, followed by preliminary assessment of low level of their power and economic efficiency.

Existing theory of locomotive traction [1] considers motion of a train which is a system of material objects (locomotive and cars) as a motion of a material point where all the weight of the train is concentrated. This much reduced mathematical model permitted to analyze progressive motion of the train by the laws of Newton. Automatically

ignored are energy processes within the system of material bodies itself. Particularly friction losses in the coupling and in other devices, which participate in transmission of power from locomotive to wheel pairs, are not considered, thus coming into conflict with tribology laws.

The author suggests another approach of traction calculation, when the train is simulated as consecutive and parallel kinematic chain (KC). Simultaneously the most efficient variant of KC is determined. As alternative to traditional scheme of rail train led by locomotive (pic. 1a) the author proposes to consider a construction where kinematic links are simplified and partially replaced by electric links (pic. 1b). This scheme is named modular scheme. A module represents a cluster unit of rolling stock with motor car coupled with one or several ordinary (without traction) cars.

The author admits that the realization of motor car scheme is technically complicated see large number of power consumers in the train. Nevertheless the motor car scheme has been largely developed for electric passenger trains. That's why author argues that similar scheme should not be positively rejected for freight trains in future.

Key words: railway, freight train, rolling stock, modular scheme, gas turbine locomotive.

REFERENCES

1. Rules of traction calculation for train operation [*Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty*]. Moscow, Transport publ., 1985, 287 p.

2. Alexandrov I. K. Power analysis of mechanisms and machines. Theoretical and experimental substantiation of the fundamentals of the study and of determination of power losses in mechanisms and machines [*Energeticheskiy analiz mekhanizmov i mashin. Teoreticheskoe i eksperimental'noe obosnovanie printsipov issledovaniya i opredeleniya energeticheskikh poter» v mekhanizmah i mashinah*]. Monograph. Vologda, VoGTU publ., 2012, 244 p.

3. Mizintsev A. V., Kovtun A. V. Use of braking energy of the train as a mean to save resources at the railway of direct current [*Ispol'zovanie energii tormozheniya poezda kak sposob ekonomii resursov na zheleznoy dorozhe postoyannogo toka*]. *Nauka i transport*, 2012, № 3, pp. 34–35.

4. URL: <http://venture-biz.ru>. Last accessed 17.07.2013.

5. Kurbasov A. S. Heavy load freight train traffic at Russian railways: pros and contras. [*Tyazhelovesnoe*

If we assume that the further development of heavy load trains continues by placing more and more powerful locomotives at the head of trains, it will cause reduced power efficiency, growing risk of their stretching, exceeding of admissible value of friction of wheel pairs of locomotive, breaking of couplers, deformation of lower frame of first cars, which are designed with account for definite value of stretching and impact load.

On the contrary the development of heavy load trains on the basis of modular technology could help to maintain (or even to reduce) traction load on the coupler within admissible values and to compose trains of any freight load, without contradicting physics laws, defining rate of adhesion of wheel pair with rail, and without increasing axle load, section power and weight of locomotives. The modular scheme takes into the account factors affecting longevity and reliability of rails. Australian railways have already used super heavy load modular train with eight locomotives, distributed along the train (in other words they use eight modules), and 682 cars [8]. So the modular trains represent engineering approach which has already been implemented.

dvizhenie gruzovykh poezdov na rossiyskikh zheleznykh dorogah: za i protiv]. *Nauka i transport*, 2012, № 3, pp.15–17.

6. Alexandrov I. K. Energetic inefficiency of branched kinematic chains [*Energeticheskaya neeffektivnost» razvetrylennykh kinematicheskikh tsepey*]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2010, № 4, pp.20–28.

7. Alexandrov I. K. Energy Inefficiency of Branched Kinematic Chains // ISSN 1068–798X, *Russian Engineering Research*, 2010, Vol. 30, No4, pp. 335–342.

8. Guinness records book. URL: <http://rekordy-ginnesa>. Last accessed 17.07.2013.

9. Patent № 2378742 S1 RF. Device for electric direct current [*Ustroystvo dlya polucheniya elektricheskoy energii postoyannogo toka*]. I. K. Alexandrov, E. V. Nesgovorov, V. A. Rakov. Deposited 17.11.2008; published 10.01.2010, *B.I.* № 1.

10. Alexandrov I. K., Rakov V. A. New highly effective kind of power for electric vehicles [*Novyy vysokoeffektivnyy vid istochnika energii dlya elektromobiley*]. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2011, № 6 (24), pp.58–60.

Координаты автора (contact information): Александров И. К. (Alexandrov I. C.) – alex@mh.vstu.edu.ru.
Статья поступила в редакцию / article received 25.06.2013
Принята к публикации / article accepted 19.07.2013

РЕЗЮМЕ

Предлагаемые автором теоретические построения и расчеты подкреплены конкретными соображениями о возможных направлениях внедрения новых подходов на практике, в первую очередь в отношении тяжеловесных поездов. Вместе с тем, и это подчеркивает сам автор, речь не идет об их немедленном внедрении ввиду сложности сопутствующих технических вопросов. Постановка проблемы носит дискуссионный характер и ставится в плоскости необходимости дальнейшего

обсуждения. По нашему мнению, если такая дискуссия будет вестись, то она должна обязательно затронуть ряд технологических аспектов, например, способов обеспечения согласованности работы тяговых двигателей, а также целый блок экономических проблем, включая сравнение эффективности эксплуатации действующей модели и предлагаемой, расходов на приобретение и обслуживание дополнительных единиц подвижного состава с получаемой выгодой.

