



# Инновационные перспективы тягового электроподвижного состава



Алексей ВОРОТИЛКИН  
Aleksey V. VOROTILKIN

Николай МИХАЛЬЧУК  
Nikolai L. MIKHALCHUK



Наталья РЯБЧЕНОК  
Natalia L. RYABCHENOK

Татьяна АЛЕКСЕЕВА  
Tatiana L. ALEKSEEVA



## Innovative Prospects for Traction Electric Rolling Stock (текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 71)

**Железнодорожный транспорт выполняет серьезные стратегические задачи, касающиеся потребностей государства, товарного рынка, перевозочного процесса. В контексте масштабной деятельности отрасли авторы статьи оценивают перспективы инновационного развития одного из направлений этого ряда – энергосберегающих технологий в сфере производства и эксплуатации тягового подвижного состава. Исследователи связывают сопутствующие теме проблемы с достижением равенства работ при генерировании и потреблении электроэнергии, актуальностью уточнения математической сути закона сохранения энергии, помогающего учесть объективные физические процессы в системе энергоснабжения железных дорог.**

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, система энергоснабжения, тяговый подвижной состав, энергосберегающие технологии, закон сохранения энергии, режимы регулирования мощности, рекуперация, инновационное развитие.

*Воротилкин Алексей Валерьевич – вице-президент ОАО «Российские железные дороги», Москва, Россия.*

*Михальчук Николай Львович – заместитель начальника Дирекции тяги (по развитию) – филиала ОАО «Российские железные дороги», Москва, Россия.*

*Рябченко Наталья Леонидовна – кандидат технических наук, доцент Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия.*

*Алексеева Татьяна Леонидовна – кандидат технических наук, доцент Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия.*

**П**еред холдингом ОАО «РЖД» ставятся все более масштабные задачи в плане транспортного обеспечения экономики страны. В рамках этих задач сформирована стратегия развития холдинга на период до 2030 года. Утвержденные стратегические инициативы реализуют инновационный путь развития на основе разработки и внедрения технических и технологических решений, предполагающих наибольший мультипликативный эффект. Ожидаемый эффект должен обеспечить значительный рост производи-

тельности, более полное использование ресурсов отрасли.

Одной из стратегических инициатив является обновление и унификация локомотивного парка. В конструкцию тягового подвижного состава намечается внести инновационные изменения, которые помогли бы добиться снижения потребления электроэнергии и непроизводительных потерь энергии во всех режимах работы, экологической нагрузки на окружающую среду, повышения коэффициента полезного действия, коэффициента использования мощности двигателей на тягу для тепловозов и электровозов.

Например, на перспективу рассматривается создание скоростных грузовых электровозов (до 140–160 км/ч), развитие линейки пассажирских электровозов переменного и постоянного тока с асинхронным приводом (до 200 км/ч), а также модификация существующих локомотивов за счет преимущественного использования отечественной элементной базы. Последнее актуально, поскольку в соответствии с объявленным курсом в стране на импортозамещение следует учитывать прогноз по минимизации рисков, связанных с перестройкой и переориентацией на поставки отечественных комплектующих [1].

Управление скоростными и тяговыми режимами современного электроподвижного состава (ЭПС) с коллекторными и асинхронными тяговыми электродвигателями выполняется полупроводниковыми преобразователями за счет импульсной передачи электрической энергии из контактной сети на локомотив. С увеличением глубины регулирования мощности локомотива отечественного и импортного производства энергетическая эффективность железной дороги снижается, ухудшается электромагнитная совместимость электровозов с системой электроснабжения, окружающей природной среде наносится определенный ущерб. Реализация программы развития отрасли, устранение отмеченных проблем и дальнейшее совершенствование тягового подвижного состава возможны, полагаем, при уточнении теории энергетических процессов в электрической цепи, применении теоретических результатов в процессе разработки новых технических решений и адресном

использовании достижений научно-технического прогресса.

Законы движения и распределения энергии, открытые профессором Н. А. Умовым [2] в 1874 году и формализованные применительно к электромагнитному полю профессором Д. Г. Пойнтингом [3] в 1884 году (1), и сегодня используются при оценке эффективности энергетической системы в режимах регулирования мощности. Процедура учитывает принятые исходные. Для произвольного объема  $V$ , ограниченного поверхностью  $S$ , электромагнитное поле изменяется во времени  $t$ . Внутри объема  $V$  имеются проводящие тела, а среда однородна и изотропна, сторонние источники энергии отсутствуют, отраженная волна отсутствует.

$$-\oint_S \vec{E} \cdot \vec{H} \cdot d\vec{S} = \int_V \vec{\delta} \cdot \vec{E} \cdot dV + \int_V \left( \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot dV, \quad (1)$$

где  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  – вектор напряженности электрического поля и вектор напряженности магнитного поля соответственно, вызванные действием сторонних сил в процессе генерирования энергии;

$\vec{\delta}$  – вектор плотности тока проводимости;

$\vec{B}$  – вектор магнитной индукции;

$\vec{D}$  – вектор электрического смещения.

В идеальном случае, когда работа сторонних сил источника энергии по обеспечению напряженности электрического поля  $E$  и напряженности магнитного поля  $H$  изменяется в соответствии с объемом потребленной энергии, левая часть равенства (1) равна правой части. Сезонные, суточные циклы изменения мощности потребителей энергии с помощью коммутационных аппаратов позволяют изменять мощность генераторов, технологию, объемы производства и передачи энергии для снижения потерь энергии и обеспечения энергосбережения.

В России и за рубежом изготавливаются полупроводниковые регуляторы мощности с продолжительностью цикла проводящего и непроводящего состояния полупроводниковых приборов, которое измеряется в миллисекундах или микросекундах. В режимах электроэнергетической системы, когда за



указанную продолжительность цикла передачи энергии регулятором мощности работа сторонних сил источника энергии не изменяется по различным причинам (инерционность оборудования, технологическая и экономическая целесообразность корректировки режима энергоисточника, формирование в сети стандартных электрических величин), закон сохранения энергии, обоснованный теоремой Умова–Пойнтинга (1), в системе нарушается.

Причины снижения эффективности энергетической системы железной дороги и качества электроснабжения при сокращении продолжительности цикла передачи потока энергии из контактной сети на локомотив полупроводниковыми регуляторами мощности логично связать с уточнением теории энергетических процессов. Корректировка известного закона сохранения энергии нужна как для выявления причин неудовлетворительной работы оборудования, так и определения перспективных направлений развития техники. Теоремой Умова–Пойнтинга учитывается изменение продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии из-за реактивных элементов, когда часть работы источника энергии затрачивается на изменение электромагнитной энергии и энергообмен.

В нашем исследовании получена зависимость эффективности энергетической системы железной дороги от изменения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии и использования ее для тяги поездов не только реактивными элементами, но и силовыми полупроводниковыми приборами (СПП) регулятора мощности локомотива. Уточненный закон сохранения энергии в электроэнергетической системе [4] с учетом несоответствия работы в процессе производства электрической энергии и потребленной электрической энергии локомотивом можно записать в виде

$$\begin{aligned} & - \left[ \oint_S (\vec{E}_G \cdot \vec{H}_G) \cdot d\vec{S} - \oint_S (\vec{E}_p \cdot \vec{H}_p) \cdot d\vec{S} \right] = \\ & = \int_V \vec{\delta} \cdot \vec{E} \cdot dV + \int_V \left( \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) dV, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\vec{E}_G$ ,  $\vec{H}_G$  – вектор напряженности электрического поля и вектор напряженности магнитного поля соответственно, вызван-

ные действием сторонних сил в процессе генерирования энергии в контактную сеть;

$\vec{E}_p$ ,  $\vec{H}_p$  – векторы напряженности

электромагнитного поля, вызванные работой сторонних сил в процессе генерирования энергии в контактную сеть во время непроводящего состояния СПП регулятора мощности локомотива;

$\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  – векторы напряженности электромагнитного поля, вызванные работой сторонних сил в процессе генерирования энергии в контактную сеть во время проводящего состояния СПП регулятора мощности локомотива.

Вторым интегралом в левой части уравнения (2) учитывается изменение регулятором мощности локомотива продолжительности использования электрической энергии в контактной сети для тяги поезда.

С переходом от векторных величин в уравнении (2) к их скалярным значениям баланс мощности имеет вид:

$$\sqrt{S_G^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (3)$$

Различные способы импульсного управления потоком энергии из контактной сети полупроводниковыми регуляторами мощности локомотивов вызывают нелинейные искажения кривой мгновенных значений напряжения в контактной сети и системе внешнего электроснабжения.

Если нелинейные электрические величины разложить в ряд Фурье [5], то можно рассчитать мощности в уравнении (3).

Полная мощность на входе полупроводникового регулятора:

$$S_G = U \cdot I, \quad (4)$$

где  $U$  – действующее значение напряжения на входе регулятора.

$I$  – действующее значение тока на входе регулятора.

Мощность  $\Delta S$  представляет собой составляющую полной мощности на входе полупроводникового регулятора, характеризующая ту часть энергетического потенциала контактной сети, которая не используется для тяги поезда или с помощью этой части энергетического потенциала не обеспечивается энергообмен в системе. Так как напряжение  $U_p$  прикладывается к СПП полупроводникового регулятора мощности во время их непроводящего состояния (во время паузы между импульсами),

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{pk}^2 \cdot I_k^2} = U_p \cdot I, \quad (5)$$

где  $U_{pk}$  — действующее значение напряжения  $k$ -й составляющей ряда Фурье на входе регулятора мощности локомотива во время непроводящего состояния СПП;

$I_k$  — действующее значение тока одноименной  $k$ -й составляющей ряда Фурье на входе регулятора мощности локомотива;

$U_p$  — действующее напряжение, которое прикладывается к регулятору мощности во время непроводящего состояния СПП;

$k$  — номер составляющей ряда Фурье.

Активная мощность

$$P = U_{co} \cdot I_o + \sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k, \quad (6)$$

где  $U_{co}$ ,  $U_{ck}$  — постоянная составляющая напряжения и действующее значение напряжения  $k$ -й гармоники на входе регулятора мощности во время проводящего состояния полупроводниковых приборов;

$I_o$ ,  $I_k$  — постоянная составляющая тока и действующее значение тока одноименной  $k$ -й гармоники на входе регулятора мощности;

$\varphi_k$  — угол сдвига по фазе  $k$ -й гармоники тока относительно одноименной гармоники напряжения на входе регулятора мощности;

$n$  — номер последней из учитываемых гармоник.

Реактивная мощность

$$Q = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{ck}^2 \cdot I_k^2 \cdot \sin^2 \varphi_k}. \quad (7)$$

Мощности можно рассчитать по формулам (4–7) с высокой точностью при помощи современных компьютерных программ, а на практике измерить величины приборами, по их показаниям найти отдельные составляющие выражения (3) и проверить баланс мощности.

Аналитическое выражение коэффициента мощности  $K_m$ , позволяющего оценить эффективность использования электрической энергии для тяги поездов с учетом реактивных элементов и оценки работы регуляторов мощности локомотивов (8), можно получить, используя выражение (3):

$$K_m = \frac{P}{S_g} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + \Delta S^2}} \cdot \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = K_c \cdot K_Q, \quad (8)$$

$$\text{где } K_c = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + \Delta S^2}} - \text{коэффициент,}$$

учитывающий изменение продолжительности использования электрической энергии для тяги поезда регулятором мощности локомотива;

$$K_Q = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} - \text{коэффициент, учиты-}$$

вающий изменение реактивными элементами электрической цепи продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в механическую работу и тепловые потери.

Под продолжительностью использования электрической энергии понимается часть времени цикла потребления локомотивом электрической энергии из контактной сети для тяги поезда, а также энергообмена между реактивными элементами и источником энергии.

С учетом (4–7) из выражения (3) можно вычленить идеи для перспективных направлений технических решений, касающихся регуляторов мощности тягового электроподвижного состава —

$$\sqrt{I^2 \cdot U^2 - I^2 \cdot U_p^2} = \sqrt{P^2 + Q^2};$$

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_p^2}}. \quad (9)$$

Действующий ток, потребляемый из системы электроснабжения (9), зависит от действующего напряжения на входе регулятора мощности локомотива, объема работы, выполняемой электрической энергией, а также напряжения на входе регулятора во время паузы в потоке энергии из контактной сети на локомотив.

Таким образом, минимальный действующий ток, потребляемый тяговым электроподвижным составом, электромагнитная совместимость локомотива с системой электроснабжения достигаются за счет полного использования напряжения на входе регулятора мощности локомотива  $U$  и реализации реактивной энергии  $Q$ , которая накоплена в обмотках тяговых электродвигателей для тяги поезда.

Полупроводниковые регуляторы мощности изменяют продолжительность использования электрического потенциала



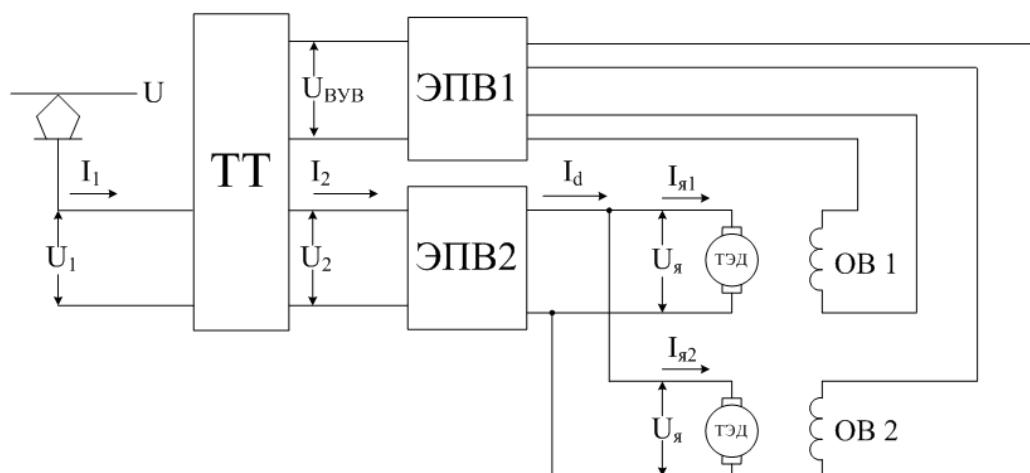


Рис. 1. Функциональная схема тягового электропривода тележки электровоза.

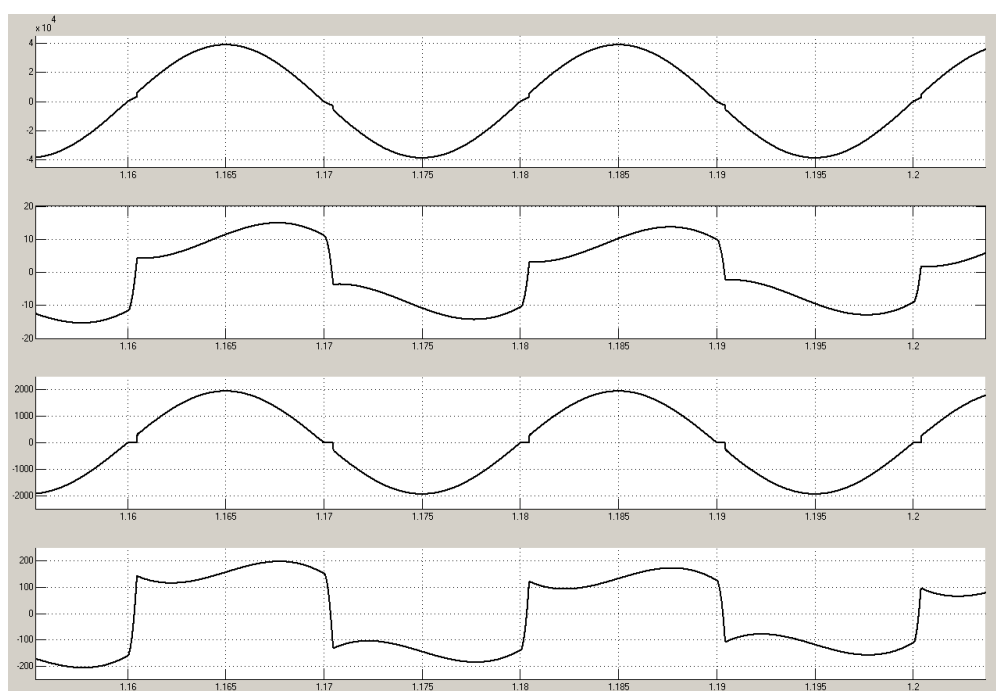
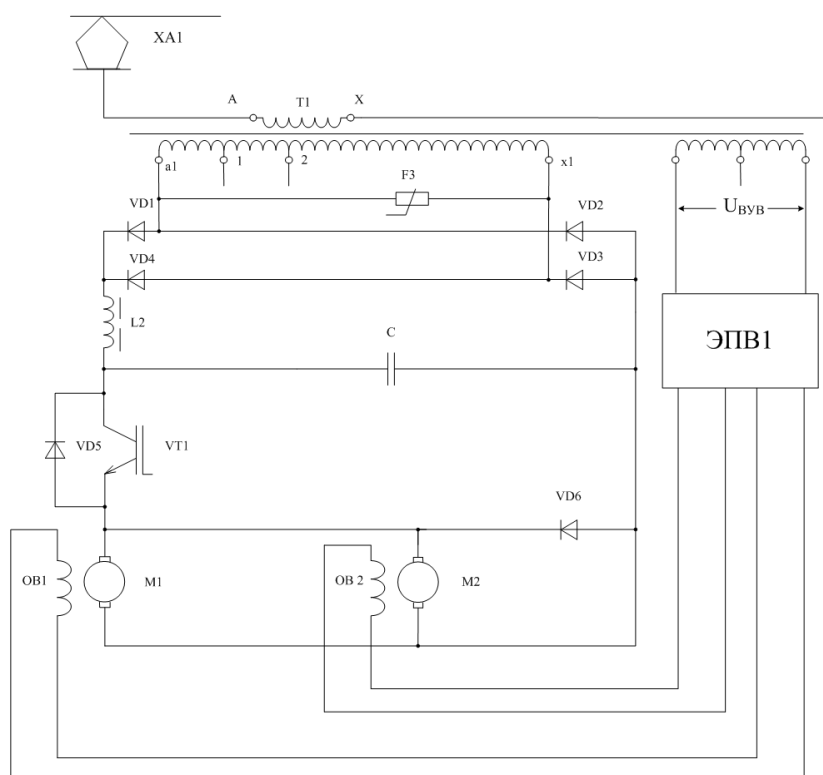


Рис. 2. Осциллограммы напряжения  $u_1$ , тока  $i_1$  в первичной обмотке и  $u_2$ ,  $i_2$  во вторичной обмотке тягового трансформатора при работе ЭПВ.

источников энергии. Для обеспечения высокой энергетической эффективности системы (8, 9) нельзя сокращать продолжительность необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии ( $U_p \rightarrow 0$ ,  $Q \rightarrow 0$ ).

Продолжительность необратимого преобразования электрической энергии в иной вид за цикл потребления энергии не сокращается коммутационным оборудованием, если регулирование мощности выполняет-

ся за счет изменения электрического сопротивления элементов электроэнергетической системы. Не случайно в бытовых электроплитах регулирование мощности конфорок осуществляется переключением секций нагревателей с последовательного соединения на смешанное и параллельное. Таким же образом выполняется регулирование скоростного и тягового режима электроподвижного состава железнодорожного и городского транспорта, когда



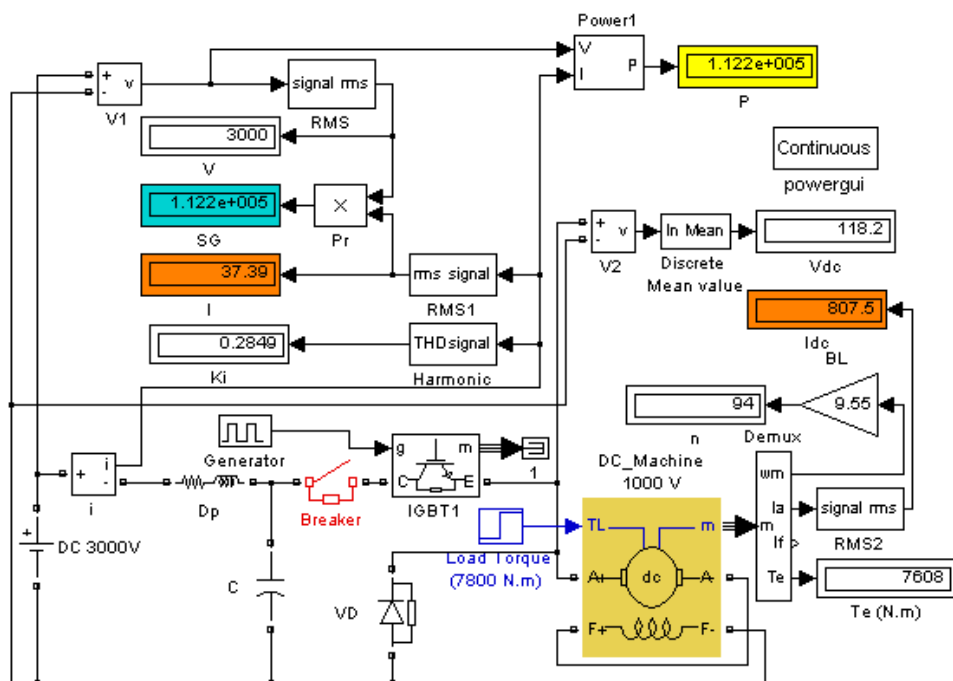
**Рис. 3. Принципиальная электрическая схема ЭВ2 для управления тяговым электроприводом тележки электровоза.**

путем группировки тяговых электродвигателей изменяется их эквивалентное электрическое сопротивление. В стабилизаторах напряжения, тяговом электроприводе широко применяется способ многозонного регулирования мощности за счет изменения входного электрического сопротивления трансформатора переключением секций его обмоток. В электрических сетях для поддержания отклонения напряжения в допустимых пределах применяются в силовых трансформаторах переключение без возбуждения и регулирование под нагрузкой. С изменением коэффициента трансформации изменяется входное электрическое сопротивление трансформатора с нагрузкой.

Проверенная многолетней практикой эффективность различных технических решений регулирования мощности потребителей энергии путем изменения электрического сопротивления и недостатки регуляторов напряжения подтверждают правомерность аналитических выражений (2–9) для характеристики физических процессов в энергетической системе.

Техническая реализация аналитически обоснованного условия минимального тока в электроэнергетической системе возможна, если вместо известных способов изменения напряжения при управлении мощностью изменять входное электрическое сопротивление полупроводниковыми регуляторами мощности [6–10]. Такие регуляторы, изменяющие входное электрическое сопротивление, принципиально отличаются от известных аналогов тем, что они обладают свойством электрического вариатора (рис. 1).

Энергосбережение с применением электрических полупроводниковых варисторов (ЭПВ) достигается не только за счет потребляемого от источника энергии минимального тока, но и за счет устранения электромагнитных помех (рис. 2) и электромагнитной совместимости элементов системы. При напряжении во вторичной обмотке тягового трансформатора ТТ  $U_2 = 1260$  В, токе на выходе варистора ЭПВ2  $I_d = 1620$  А и скорости электровоза 5 км/ч со вторичной обмотки тягового трансформатора потребляется ток  $I_s = 260$  А. Незави-



**Рис. 4. Математическая модель тягового электропривода с электрическим полупроводниковым вариатором.**

симое возбуждение тяговых электродвигателей ТЭД двух тележек электровоза обеспечивается вариатором ЭПВ1. По четырём обмоткам возбуждения (ОВ) двух тележек протекает номинальный ток 810 А, а на входе ЭПВ1 он равен 230 А. Уровень пульсаций тока в обмотках электродвигателей не превышает 2% без применения сглаживающих реакторов.

Ток в обмотках возбуждения можно регулятором синхронно увеличивать и уменьшать от номинальной величины до нуля и корректировать ток в каждой обмотке с учетом разброса параметров колесно-моторного блока (КМБ).

Нелинейные искажения напряжения наблюдаются в момент коммутации тока в диодах выпрямителя ЭПВ (рис. 2), а их уровень значительно ниже допустимых величин, поэтому не нужно устранять так называемую «мощность искажения» и не требуется изготавливать фильтры для устранения электромагнитных помех. Основная гармоника тока практически совпадает с основной гармоникой напряжения на входе регулятора, значит не нужны и компенсаторы «мощности сдвига», нет необходимости в использовании на ЭПС сложных входных пре-

бразователей типа четырехквadrантных  
4-qS.

На этапе пуска, трогания и разгона поезда действующий ток на входе известных регуляторов мощности по отношению к номинальным токам ТЭД  $I_H$  повышается до  $1,6 \cdot I_H$ , а на входе электрического полупроводникового вариатора действующий ток не превышает  $0,5 \cdot I_H$ .

Вместо выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП), который содержит 8 плеч выпрямителя на тиристорах, для четырехзонного регулирования мощности можно применить ЭПВ2 (рис. 3).

На рис. 4 представлена математическая модель тягового электропривода постоянного тока номинальной мощностью 765 кВт, работающего с моментом на валу ТЭД 7608 Н·м и частотой вращения вала 94 об./мин. Полная мощность на входе ЭПВ  $S_{\text{г}} = 112,2$  кВА, активная мощность  $P = 112,2$  кВт, поэтому  $\Delta S = 0$  и вся электрическая энергия контактной сети реализуется для тяги поезда и выделяется в виде тепловой энергии потерь в приводе.

В настоящее время на железных дорогах применяется высокоскоростной тяговый электроподвижной состав с бесколлекторными ТЭД. Импульсная передача электри-

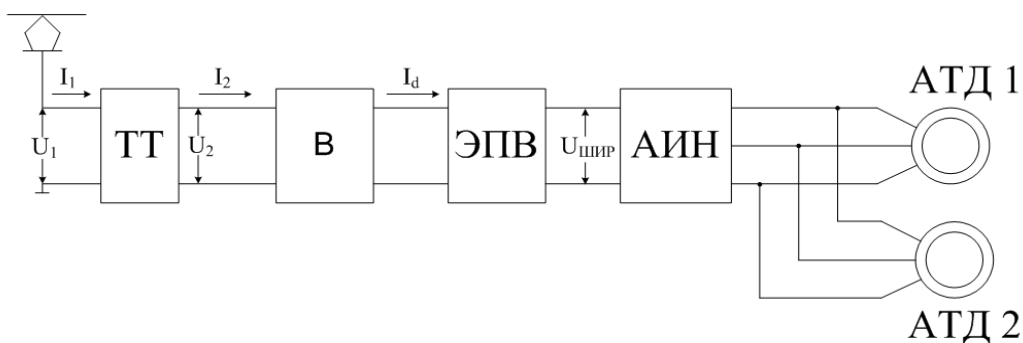


Рис. 5. Функциональная схема тягового электропривода высокоскоростных ЭПС с использованием ЭПВ.

ческой энергии из контактной сети на локомотивы выполняется за счет автономных инверторов напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) для питания локомотива от контактных сетей постоянного тока и с использованием 4-qS преобразователей — для питания от сетей переменного тока.

Изготовлением высокоскоростного тягового электроподвижного состава, на который непрерывно передается электрическая энергия из контактной сети посредством ЭПВ (рис. 5), можно обеспечить высокую энергетическую эффективность и электромагнитную совместимость локомотива с системой электроснабжения.

Для плавного управления мощностью асинхронных трехфазных тяговых двигателей (АТД) автономным инвертором напряжения (АИН) можно формировать 3-фазное переменное напряжение регулируемой частоты, а с помощью ЭПВ изменять ширину импульсов напряжения  $U_{\text{шпир}}$  на входе АИН в зависимости от частоты напряжения на выходе АИН. Такая структура тягового электропривода значительно упрощает конструкцию преобразователя частоты, но не исключает возможность применения АИН с ШИМ.

Рекуперация электрической энергии в систему электроснабжения от тяговых электрических машин целесообразна, когда их электрический потенциал обеспечивает повышение напряжения в сети переменного тока. В подобных рекуператорах [8, 11] коммутация тока совершается в момент перехода переменным напряжением сети через ноль. Техническая реализация непрерывной передачи электрической

энергии может выполняться встречно-параллельно включенными диодами VD1-VD4 (рис. 3) — IGBT-транзисторами модуля. Регулирование мощности, отдаваемой в сеть переменного тока, производится за счет управления током в обмотках возбуждения ТЭД. В режиме рекуперации это достигается изменением электрического сопротивления ТЭД, причем устройство приобретает свойства ЭПВ. В данном случае устраняются уравнивающие токи, возникающие при работе ВИП в режиме инвертора, которые снижают действующее напряжение в сети переменного тока и вызывают нелинейные искажения формы кривой напряжения. В аварийной ситуации и при экстренном торможении поезда управление силовыми транзисторами модуля может осуществляться в соответствующем алгоритме тиристорами ВИП.

В разработанных и апробированных на практике полупроводниковых регуляторах мощности без промежуточных накопителей энергии и фильтров для управления электротермическими установками и электроприводом мощностью 300 кВт [12], а также для управления производительностью мотор-вентиляторов мощностью 220 кВт [13] электровоза изменяется величина входного электрического сопротивления устройств без сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии.

## ВЫВОДЫ

1. Задачи инновационного развития отрасли можно выполнить на основе модернизации и организации производства эффективного, высокопроизводительного





отечественного подвижного состава, с оптимальной нагрузкой на инфраструктуру и минимизацией негативного влияния на окружающую среду, обеспечением энергооптимальных технологий движения поезда.

2. Энергосбережение в электроэнергетических железнодорожных сетях достигается, если достигается равенство работы при генерировании и потреблении электрической энергии, поэтому уточнением математического выражения закона сохранения энергии учтены объективные физические процессы в системе.

3. Задача бережного использования электрической энергии решается путем плавного регулирования мощности в процессе потребления и передачи энергии без сокращения продолжительности необратимого преобразования электрической энергии в иной вид энергии.

4. Использование в качестве параметра управления мощностью в электроэнергетических системах электрического сопротивления элементов вместо общепринятого напряжения обеспечивается практически непрерывное преобразование электрической энергии для тяги поездов.

5. Полупроводниковые регуляторы мощности, изменяющие входное электрическое сопротивление, приобретают свойство электрического полупроводникового вариатора и этим кардинально отличаются от аналогов отечественного и импортного производства.

6. Регулированием мощности локомотива за счет изменения электрического сопротивления в процессе передачи и потребления электроэнергии из контактной сети обеспечивается высокая энергетическая эффективность и электромагнитная совместимость локомотива с системой электроснабжения без применения дополнительного оборудования.

7. Усиление тягового электроснабжения рекуперацией энергии становится реальным отраслевым ресурсом при сохранении непрерывного потока энергии от ТЭД в контактную сеть.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года / Министерство образования и науки Российской Федерации. — М., 2013.
2. Умов Н. А. Избранные сочинения. — М.—Л.: Гостехиздат, 1950. — 571 с.
3. Poynting J. H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field / Philosophical Transactions of the Royal Society. — London: 175, 1884. — pp. 343–361.
4. Электронные преобразователи для ресурсосберегающих технологий / Т. Л. Алексеева, Н. Л. Рябченко, Н. М. Астраханцева, Л. А. Астраханцев. — Иркутск: ИрГУПС, 2010. — 240 с.
5. Власова Е. А., Зарубина В. С., Крищенко А. П. Ряды. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 615 с.
6. Рябченко Н. Л., Алексеева Т. Л., Астраханцева Н. М. и др. Причина снижения эффективности преобразования электрической энергии и электромагнитной совместимости элементов в электротехническом комплексе // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы Третьей всероссийской научно-практ. конференции. — Иркутск: ИрГУПС, 2013. — С. 370–376.
7. Патент на изобретение № 2367082. Российская Федерация. Способ регулирования напряжения и устройство трехфазного выпрямителя / Т. Л. Алексеева, Н. Л. Рябченко, Н. М. Астраханцева и др. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели», 2009, № 25.
8. Патент на изобретение № 2377631. Российская Федерация. Способ регулирования мощности и устройство трехфазного инвертора / Т. Л. Алексеева, Л. А. Астраханцев, В. А. Тихомиров, К. П. Рябченко. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели», 2009, № 36.
9. Патент на изобретение № 2388136. Российская Федерация. Способ регулирования мощности и устройство преобразователя сопротивления для электрических машин переменного тока / Т. Л. Алексеева, Л. А. Астраханцев, К. П. Рябченко. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели», 2010, № 3.
10. Патент на изобретение № 2427878. Российская Федерация. Способ и устройство регулирования мощности нагрузки / Н. Л. Рябченко, Т. Л. Алексеева, Л. А. Астраханцев и другие. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели», 2011, № 24.
11. Патент на изобретение № 2377632. Российская Федерация. Способ регулирования мощности и устройство однофазного инвертора / Н. Л. Рябченко, Н. М. Астраханцева, А. И. Орленко, М. Е. Алексеев. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели», 2009, № 36.
12. Патент на изобретение № 2030084. Российская Федерация. Устройство регулирования мощности на m-фазной нагрузке / Л. А. Астраханцев, Н. М. Астраханцева. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели», 1995, № 6.
13. Патент на изобретение № 2161362 Российская Федерация. Делитель напряжения. / Л. А. Астраханцев, Н. Л. Рябченко, П. Е. Рябченко. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели», 2000, № 36. ●

Координаты авторов: **Воротилкин А.В.** – Vorotilkinav@center.rzd.ru, **Михальчук Н.Л.** – Mihalchuknl@center.rzd.ru, **Рябченко Н.Л.** – astranal@mail.ru, **Алексеева Т.Л.** – talecseeva@rbcmail.ru.

Статья поступила в редакцию 16.11.2015, принята к публикации 18.12.2015.

## INNOVATIVE PROSPECTS FOR TRACTION ELECTRIC ROLLING STOCK

**Vorotilkin, Aleksey V.**, JSC Russian Railways, Moscow, Russia.

**Mikhailchuk, Nikolai L.**, JSC Russian Railways, Moscow, Russia.

**Ryabchenok, Natalia L.**, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia.

**Alekseeva, Tatiana L.**, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia.

### ABSTRACT

Rail transport performs serious strategic tasks concerning needs of state, commodity market, transportation process. In the context of far-reaching activity of the industry the authors assess prospects of innovative development of one of the directions of this series – energy saving technologies in production and

operation of traction rolling stock. Researchers associate the problems attributable to the topic with achievement of equality of work in generation and consumption of electric energy, relevance of clarifying mathematical essence of energy conservation law, which helps to take into account objective physical processes in the power supply system of railways.

**Keywords:** railway transport, power supply system, traction rolling stock, energy-saving technologies, energy conservation law, power control modes, recovery, innovative development.

**Background.** Holding company Russian Railways faces many ambitious targets in terms of transport provision of the country's economy. Within the framework of these objectives a strategy of holding development until 2030 has been formed. The approved strategic initiatives implement an innovative path of development through elaboration and implementation of technical and technological solutions involving the greatest multiplier effect. The expected effect is to provide a significant increase in performance, a better use of industry's resources.

One of strategic initiatives is to update and unify locomotive fleet. It is planned to make innovative changes in design of traction rolling stock that would help to reduce energy consumption and unproductive energy losses in all operating modes, environmental impact, improvement of efficiency, utilization of engine power to traction for diesel and electric locomotives.

**Objective.** The objective of the authors is to consider innovative prospects concerning traction electric rolling stock.

**Methods.** The authors use general scientific and engineering methods, graph construction, mathematical modeling, evaluation approach, comparative analysis.

**Results.** Future prospects provide for consideration of such issues as creation of high-speed freight electric locomotives (up to 140–160 km/h), development of line of passenger electric AC and DC locomotives with asynchronous drive (up to 200 km/h), as well as modification of existing locomotives due to preferential use of domestic element base. The last one is important because, in accordance with import substitution declared in Russia it is necessary to take into account the forecast for minimizing risks associated with restructuring and refocusing on supply of domestic components [1].

Control of speed and traction modes of modern electric rolling stock (hereinafter – ERS) with collector and asynchronous traction motors is performed by semiconductor converters due to impulse transmission of electric energy from catenary to locomotive. With increasing depth of locomotive power control of domestic and foreign production energy efficiency of the railway reduces, electromagnetic compatibility of electric locomotives with electric power supply system, the environment is damaged. Realization of the program of industry's development, elimination of problems and further improvement of traction rolling stock are possible, we believe, in refinement of the theory of energy processes in the electrical circuit, the application of theoretical results in the

development of new technical solutions and targeted use of scientific and technological progress.

The laws of motion and energy distribution, opened by professor N. A. Umov [2] in 1874 and formalized in relation to electromagnetic field by professor J. H. Poynting [3] in 1884 (1), are still used in evaluating efficiency of the energy system under power control. The procedure takes into account assumed initial values. For an arbitrary volume  $V$ , bounded by a surface  $S$ , an electromagnetic field changes over time  $t$ . Inside the volume  $V$  there are conductive bodies, and the medium is homogeneous and isotropic, external sources of energy are absent, the reflected wave is absent.

$$-\oint_S \vec{E} \cdot \vec{H} \cdot d\vec{S} = \int_V \vec{\delta} \cdot \vec{E} \, dV + \int_V \left( \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot dV, \quad (1)$$

where  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  is vector of electric field density and magnetic field vector, respectively, caused by action of external forces in the process of generating energy;

$\vec{\delta}$  is vector of conduction current density;

$\vec{B}$  is magnetic induction vector;

$\vec{D}$  is electric displacement vector.

In the ideal case, when the work of external forces of energy source to ensure density of electric field  $E$  and magnetic field  $H$  varies according to the amount of energy consumed, the left side of equation (1) is equal to the right side. Seasonal, diurnal cycles of change in capacity of energy consumers by means of switching devices allow to change the power of generators, technology, production volume and transfer of energy to reduce energy loss and provide energy savings.

In Russia and abroad semiconductor power switches are produced with duration of the cycle of conducting and non-conducting state of semiconductor devices, which is measured in milliseconds or microseconds. In modes of power system, when within a specified power transfer cycle by power control device operation of external forces of the energy source does not change for various reasons (inertia of equipment, technological and economic feasibility of adjustment of mode of energy source, formation of standard electrical quantities in the network), the energy conservation law, justified by Umov–Poynting theorem (1) is broken in the system.

Reasons for reducing efficiency of energy system of railway and power supply quality while reducing the duration of energy flux transmission cycle from catenary to the locomotive by semiconductor power regulators should be logically associated with refine-



ment of energy process theory. Adjustment of the famous energy conservation law is needed as to identify the causes of poor performance of equipment and to identify promising areas of technological development. Umov–Poynting theorem takes into account changes in the duration of irreversible conversion of electrical energy into another form of energy because of reactive elements when part of work of energy source is spent on the change of electromagnetic energy, and energy exchange.

In our study, the dependence was obtained of energy system efficiency of the railway from changes in the duration of irreversible conversion of electrical energy and its application to pull trains not only by reactive elements, but also by power semiconductor (hereinafter – PS) of locomotive power control device. The adjusted energy conservation law in the power system [4] taking into account the mismatch in the process of electricity production and consumed electric power of locomotive can be written as

$$-\left[\oint_S (\vec{E}_G \cdot \vec{H}_G) \cdot d\vec{S} - \oint_S (\vec{E}_p \cdot \vec{H}_p) \cdot d\vec{S}\right] = \\ = \int_V \vec{S} \cdot \vec{E} \cdot dV + \int_V \left( \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) dV, \quad (2)$$

where  $\vec{E}_G$ ,  $\vec{H}_G$  is vector of density of electric field and vector of density of magnetic field, respectively, caused by action of external forces in energy generation in catenary;

$\vec{E}_p$ ,  $\vec{H}_p$  are vectors of density of electromagnetic field, caused by action of external forces in energy generation in catenary in a non-conducting state of PS of locomotive power regulator;

$\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  are vectors of density of electromagnetic field caused by action of external forces in the process of generating energy in catenary while conducting state power of PS of power regulator of locomotive.

The second integral on the left side of equation (2) takes into account the change of duration of electrical energy use in catenary for traction of trains via locomotive power control.

With transition from vector quantities in equation (2) to scalar values balance of power is:

$$\sqrt{S_G^2 - \Delta S^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (3)$$

Different ways of impulse control of energy flow from catenary by semiconductor regulators of locomotive power cause harmonic distortion of curve of instantaneous voltage values in catenary and external power supply system.

If non-linear electrical quantities are expanded in a Fourier series [5], it is possible to calculate the power in the equation (3).

The total power at the input of semiconductor regulator:

$$S_G = U \cdot I, \quad (4)$$

where  $U$  is rms value of voltage at the input of the regulator.

$I$  is rms value of current at the input of regulator.

Power  $\Delta S$  is a component of the total power at the input of the semiconductor regulator, which characterizes the portion of the energy potential of catenary which is not used for train traction or energy transfer in the system is not provided by that part of the energy potential. Since voltage  $U_p$  is applied to PS of semiconductor power regulator SPR during their non-conductive state (during the pause between pulses)

$$\Delta S = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_{pk}^2 \cdot I_k^2} = U_p \cdot I, \quad (5)$$

where  $U_{pk}$  is rms of voltage of  $k$ -th component of the Fourier Series at the input of the locomotive power regulator during non-conducting state of PS;

$I_k$  is rms of current of eponymous  $k$ -th component of the Fourier series at the input of locomotive power regulator;

$U_p$  is operating voltage, which is applied to power controller during a non-conducting state of PS;

$k$  is a number of component of the Fourier series.

Active power

$$P = U_{co} \cdot I_o + \sum_{k=1}^n U_{ck} \cdot I_k \cdot \cos \phi_k, \quad (6)$$

where  $U_{co}$ ,  $I_o$  is constant component of voltage and current value of voltage of  $k$ -th harmonics at the input of power regulator during conducting state of semiconductor devices;

$I_o$ ,  $I_k$  is constant component of current and rms of current of the same name  $k$ -th harmonics at the input of power regulator;

$\phi_k$  is phase angle of  $k$ -th harmonic of current with respect to the same name harmonic of voltage at the input of power regulator;

$n$  is a number of the last of harmonics taken into account.

Reactive power

$$Q = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{ck}^2 \cdot I_k^2 \cdot \sin^2 \phi_k}. \quad (7)$$

The capacity can be calculated by formulas (4–7) with high accuracy by using modern computer programs and in practice to measure the value with instruments, then using their indications find individual components of the expression (3) and check the balance of power.

The analytical expression of power coefficient  $K_M$ , allowing to estimate the efficiency of use of electric power for train traction with account of reactive elements and evaluating the performance of locomotives power regulators (8) can be obtained using the expression (3):

$$K_M = \frac{P}{S_G} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + \Delta S^2}} \cdot \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = K_C \cdot K_Q, \quad (8)$$

where  $K_C = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + \Delta S^2}}$  is coefficient, taking into

account changes in the duration of electric energy use for traction of train by locomotive power regulator;

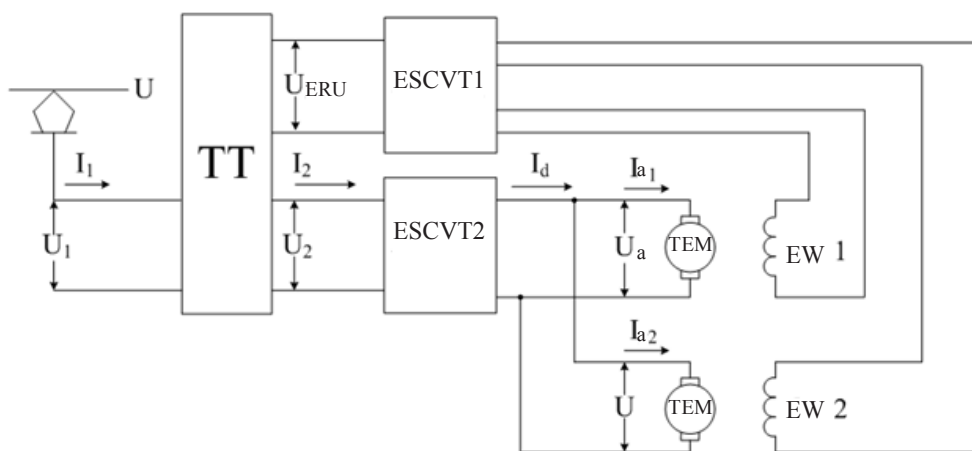
$K_Q = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$  is coefficient, taking into account

changes by reactive elements of the electric circuit in the duration of irreversible conversion of electrical energy into mechanical work and heat loss.

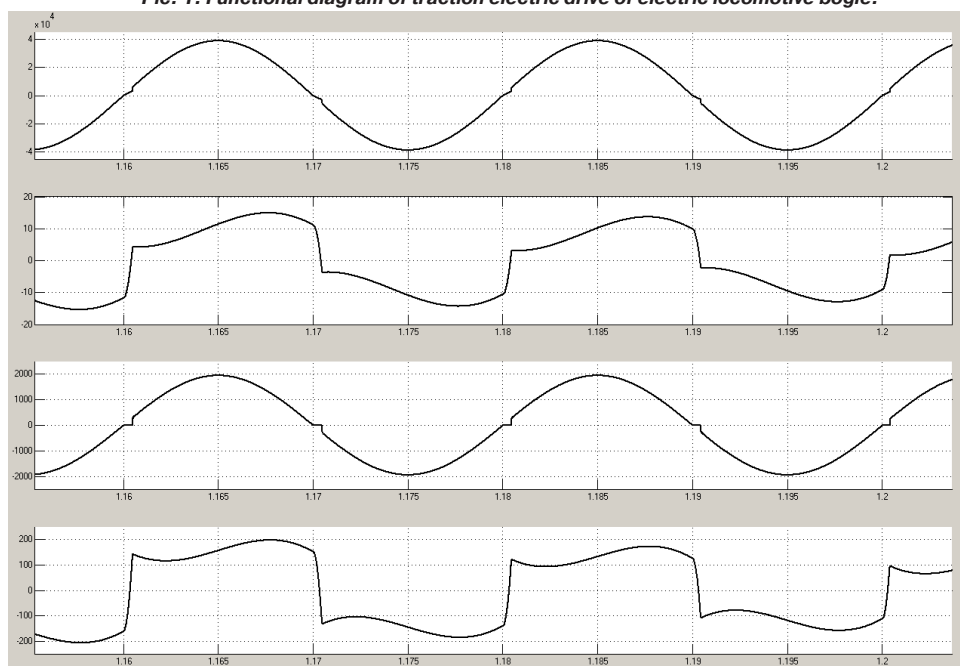
The duration of electric energy use means the part of time of cycle of energy consumption from catenary for train traction and energy exchange between reactive elements and the energy source.

In view of (4–7) from the expression (3) we can divide ideas for promising areas of technological solutions related to power regulators of traction electric rolling stock—

$$\sqrt{I^2 \cdot U^2 - I^2 \cdot U_p^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}; \\ I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{U^2 - U_p^2}}. \quad (9)$$



**Pic. 1. Functional diagram of traction electric drive of electric locomotive bogie.**



**Pic. 2. Oscillograms of voltage  $u_1$ , current  $i_1$  in the primary winding and  $u_2$ ,  $i_2$  in the secondary winding of traction transformer when ESCVT operates.**

Rms current consumed from the power supply system (9) depends on rms voltage at the input of locomotive power regulator, workload of electrical power, as well as voltage at the input of regulator during a pause in the flow of energy from catenary to the locomotive.

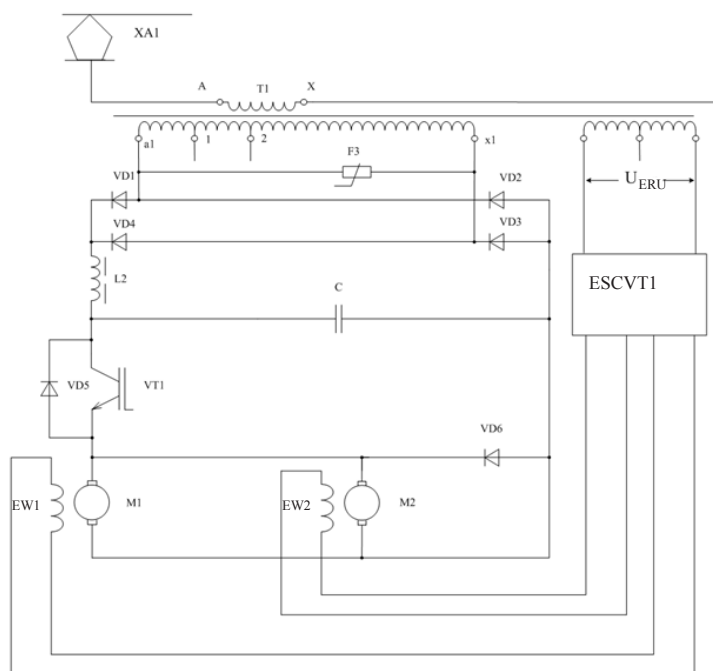
Thus, minimum rms current consumed by traction electric rolling stock, locomotive electromagnetic compatibility with the power supply system is achieved by making full use of voltage at the input of locomotive power regulator  $U$  and implementation of reactive power  $Q$ , which is accumulated in the windings of traction motors for train traction.

Semiconductor power regulators change the duration of use of the electric potential of energy sources. To ensure high energy efficiency of the sys-

tem (8, 9) it is impossible to reduce the duration of irreversible transformation of electrical energy into another form of energy ( $U_p \rightarrow 0$ ,  $Q \rightarrow 0$ ).

The duration of irreversible conversion of electrical energy into another form of energy per energy consumption cycle is not decreased by switching equipment if power control is performed by changing the electrical resistance of elements of the power system. Not by chance in household electric stoves power control of burners is performed by switching the heater section from serial connection to mixed and parallel. In the same way the regulation is carried out of speed and traction mode of electric rolling stock of rail and urban transport, when by grouping traction motors their equivalent electrical resistance changes. In constant-voltage regulators, traction motor drive





**Pic. 3. Electrical schematic diagram ESCVT2 to control traction electric drive of electric locomotive bogie.**

method of multi-zone power control is widely used by changing input electrical resistance of the transformer via switching sections of its windings. In electric networks, for maintaining the voltage deviation within an acceptable range shifting without excitation and regulation under load are used in power transformers. With the change in the transformation ratio input electric resistance of the transformer to the load changes.

Proven with long-term practice effectiveness of different technical solutions of power control of energy consumers by changing electrical resistance and voltage regulators disadvantages confirm the validity of analytical expressions (2–9) to characterize physical processes in the energy system.

Technical implementation of analytically sound condition of minimum current in the power system is possible if instead of the known methods of varying voltage at the power control input to change the input electrical resistance via semiconductor power regulators [6–10]. Such regulators, varying input electric resistance, are fundamentally different from the known analogs in that they have the property of the electric variator (Pic. 1).

Energy savings with electrical semiconducting CVT (hereinafter – ESCVT) is achieved not only due to the consumed minimum current of the energy source, but also by eliminating electromagnetic interference (Pic. 2) and electromagnetic compatibility of components of the system. When the voltage in the secondary winding of traction transformer  $U_2 = 1260$  V, current at the output of variator  $ESCVT I_2 = 1620$  A and speed of electric locomotive of 5 km/h from the secondary winding of traction transformer current  $I_2 = 260$  A is consumed. Independent excitation of traction motors TEM of two bogies of electric locomotive is provided by ESCVT1. In four of the excitation windings (hereinafter – EW) of two bogies nominal current of 810 A flows, and at the input ESCVT1 it is 230 A. The

level of current pulsation in the windings of electric motors does not exceed 2% without the use of smoothing inductors.

The current in excitation windings can be simultaneously increased and decreased from the nominal value to zero and the current can be adjusted in each winding, taking into account the spread of parameters of wheeled motor block (hereinafter – WMB).

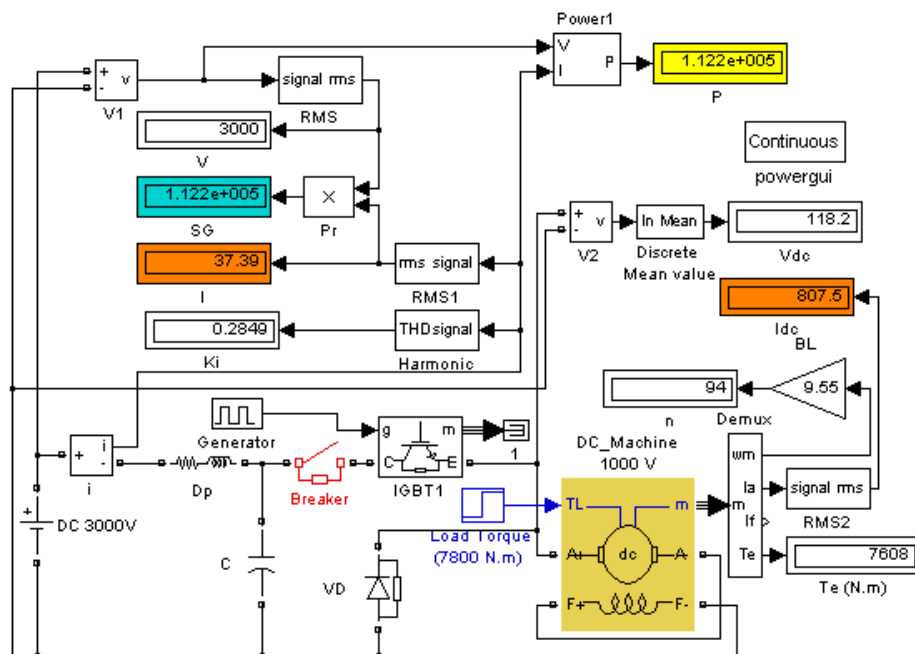
Harmonic distortions of voltage are observed at the time of current switching in diodes of the rectifier of ESCVT (Pic. 2), and their level is significantly below permissible values, so there is no need to eliminate so-called «distortion power» and it is not required to manufacture filters for eliminating electromagnetic interference. The main current harmonic practically coincides with the fundamental harmonic of voltage at the input of regulator, and therefore there is no need for compensators of «shear capacity», there is no need to use on ESCVT complex input converters of four-quadrant 4-qS type.

During startup phase, starting and acceleration of the train rms current at the input of known power regulators in relation to nominal currents TEM  $I_H$  increases to  $1,6 \cdot I_H$ , and at the input of the electric semiconductor variator rms current does not exceed  $0,5 \cdot I_H$ .

Instead of reversible converter (hereinafter – RC), which contains 8 rectifier arms on thyristors, for four-zone power control ESCVT2 can be applied (Pic. 3).

Pic. 4 shows a mathematical model of DC traction electric drive with nominal power of 765 kW operating with a torque on the shaft of TEM  $7608$  N·m and speed of the shaft 94 rpm. The total power at the input of ESCVT  $S_0 = 112,2$  kVA, active power  $P = 112,2$  kW, therefore  $\Delta S = 0$ , and all electrical energy of catenary is used for traction of trains and is released as heat energy losses in the drive.

Currently, on railways high-speed traction electric rolling stock with brushless TEM is used. Pulse trans-



**Pic. 4. Mathematical model of traction electric drive with electric semiconductor variator.**

mission of electrical energy from catenary to locomotives is performed by autonomous voltage inverter (hereinafter – AVI) with pulse-width modulation (hereinafter – PWM) to power the locomotive from DC catenary and using 4-qS converters – for supply from AC networks.

*With manufacture of high-speed traction electric rolling stock, to which electrical energy from catenary is continuously transmitted through ESCVT (Pic. 5), it is possible to provide high energy efficiency and electromagnetic compatibility of locomotive with power supply system.*

For smooth power control of asynchronous three-phase traction motors (hereinafter – ATM) via autonomous voltage inverter (hereinafter – AVI) it is possible to generate 3-phase AC voltage of variable frequency, and with ESCVT to change the width of pulses of voltage  $U_{wid}$  at the input of AVI depending on voltage frequency at the output of AVI. This structure of traction electric drive greatly simplifies the design of the frequency inverter, but does not exclude the possibility of using AVI with PWM.

Recovery of electrical energy in the power supply system from traction electric vehicles is advisable when their electric potential enhances voltage in AC network. In these recuperators [8, 11] current commutation is performed at the time of transition of alternating voltage network through zero. Technical implementation of continuous transmission of electrical energy can be made by antiparallel diodes VD1-VD4 (Pic. 3) – IGBT-transistor of module. Regulation of the power supplied to the network of alternating current is produced by controlling current in excitation windings of TEM. In recovery mode it is achieved by changing electrical resistance of TEM, the apparatus acquires the properties of ESCVT. In this case equalizing currents are removed, which are produced when RC operates as an inverter, which reduce rms voltage in the AC network and cause nonlinear distortion of the voltage waveform. In an emergency, and emergency braking of train control of module power transistors can be performed in an appropriate algorithm by thyristors of RC.

*In developed and tested semiconductor power regulator without intermediate energy storage devices and filters to control electrothermal plants and electric drive with power of 300 kW [12], as well as to control performance of motor-fans with capacity of 220 kW [13] of locomotive, the value of input electrical resistance of devices changes without reducing the length of irreversible conversion of electrical power.*

## Conclusions.

1. Objectives of innovative development of the industry can be achieved on the basis of modernization and organization of production of effective, high-performance domestic rolling stock, with optimum load on infrastructure and minimization of negative impact on the environment, ensuring energy optimal technologies of train movement.

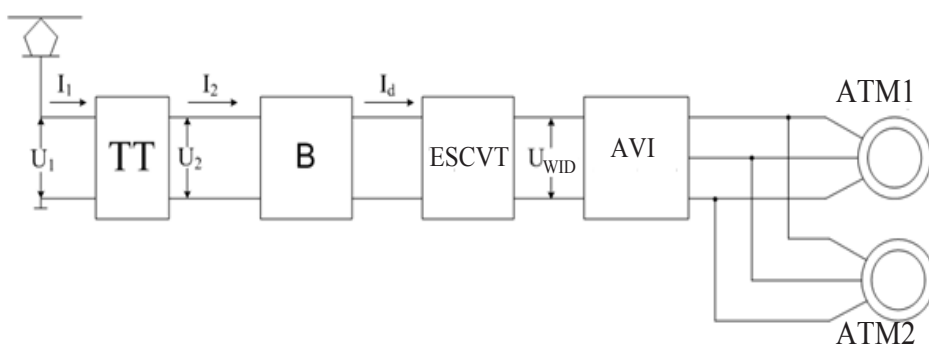
2. Energy saving in electric rail networks is achieved if the equality of operation is achieved in generation and consumption of electric energy, so the refinement of the mathematical expression of energy conservation law took into account objective physical processes in the system.

3. The task of careful use of electrical energy is achieved by modulating the power in the process of consumption and energy transmission without reducing the length of irreversible conversion of electrical energy into another form of energy.

4. Use in power systems of electrical resistance elements as of a power control parameter instead of conventional voltage provides virtually continuous conversion of electric energy for train traction.

5. The semiconductor power regulators, changing input electrical resistance, acquire the property of the semiconductor electric variator and thus are radically different from counterparts of Russian and foreign production.

6. The locomotive power control by changing electrical resistance in transmission and consumption of electric energy from catenary ensures high energy efficiency and electromagnetic compatibility of locomotive with power supply system without the use of additional equipment.



**Pic. 5. Functional diagram of traction electric drive of high-speed ERS with the use of ESCVT.**

7. Strengthening of traction power supply via energy recovery becomes a real industrial resource, while maintaining a continuous flow of energy from TEM into catenary.

## REFERENCES

1. Forecast of Scientific and Technological Development of the Russian Federation for the period up to 2030 [*Prognoz nauchno-tehnologicheskogo razvitiia Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda*]. Ministry of Education and Science, Moscow, 2013.
2. Umov, N. A. Selected Works [*Izbrannye sochinenija*]. Moscow – Leningrad, Gostehizdat publ., 1950, 571 p.
3. Poynting, J. H. On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field. *Philosactions of the Royal Society*. London: 175, 1884, pp. 343–361.
4. Alekseeva, T. L., Ryabchenok, N. L., Astrakhantseva, N. M., Astrakhantsev L. A. Electronic converters for resource-saving technologies [*Elektronnye preobrazovateli dlja resursoberegajushih tehnologij*]. Irkutsk, ISTU publ., 2010, 240 p.
5. Vlasova, E. A., Zarubina, V. S., Krishhenko, A. P. Rows [*Rjady*]. Moscow, Bauman MSTU publ., 2006, 615 p.
6. Ryabchenok, N. L., Alekseeva, T. L., Astrakhantseva, N. M. *et al.* The reason for reducing efficiency of electric energy conversion and electromagnetic compatibility of components in electric-technical complex [*Prichina snizhenija effektivnosti preobrazovanija elektricheskoi energii i elektromagnitnoj sovmestivosti elementov v elektrotehnicheskoi komplekse*]. *Transport infrastructure of Siberia: Proceedings of the Third All-Russian scientific-practical conference*, Irkutsk ISTU publ., 2013, pp. 370–376.
7. Patent for invention № 2367082. The Russian Federation. A method for controlling voltage and three-phase rectifier device [*Patent na izobretenie № 2367082. Rossijskaja Federacija. Sposob regulirovanija naprjazhenija i ustrojstvo trehfaznogo vyprjatelja*]. T. L. Alekseeva, N. L. Ryabchenok, N. M. Astrakhantseva *et al.* Published in the Official Bulletin «Inventions. Utility Models», 2009, № 25.
8. Patent for invention № 2377631. The Russian Federation. Power control method and three-phase inverter device [*Patent na izobretenie № 2377631. Rossijskaja Federacija. Sposob regulirovanija moshhnosti i ustrojstvo trehfaznogo invertora*]. T. L. Alekseeva, L. A. Astrakhantsev, V. A. Tikhomirov, K. P. Ryabchenok. Published in the Official Bulletin «Inventions. Utility Models», 2009, № 36.
9. Patent for invention № 2388136. The Russian Federation. A method of power control and resistance converter device for AC electrical machines [*Sposob regulirovanija moshhnosti i ustrojstvo preobrazovatelja soprotivlenija dlja elektricheskikh mashin peremennogo toka*]. T. L. Alekseeva, L. A. Astrakhantsev, K. P. Ryabchenok. Published in the Official Bulletin «Inventions. Utility Models», 2010, № 3.
10. Patent for invention № 2427878. The Russian Federation. Method and device for load power control [*Patent na izobretenie № 2427878. Rossijskaja Federacija. Sposob i ustrojstvo regulirovanija moshhnosti nagruzki*]. N. L. Ryabchenok, T. L. Alekseeva, L. A. Astrakhantsev *et al.* Published in the Official Bulletin «Inventions. Utility Models», 2011, № 24.
11. Patent for invention № 2377632. The Russian Federation. Power control method and single-phase inverter device [*Patent na izobretenie № 2377632. Rossijskaja Federacija. Sposob regulirovanija moshhnosti i ustrojstvo odnofaznogo invertora*]. N. L. Ryabchenok, N. M. Astrakhantseva, A. I. Orlenko, M. E. Alekseev. Published in the Official Bulletin «Inventions. Utility Models», 2009, № 36.
12. Patent for invention № 2030084. Russian Federation. Power control device on m-phase load [*Patent na izobretenie № 2030084. Rossijskaja Federacija. Ustrojstvo regulirovanija moshhnosti na m-faznoj nagruzke*]. L. A. Astrakhantsev, N. M. Astrakhantseva. Published in the Official Bulletin «Inventions. Utility Models», 1995, № 6.
13. Patent for invention № 2161362 Russian Federation. Voltage divider [*Patent na izobretenie № 2161362 Rossijskaja Federacija. Delitel' naprjazhenija*]. L. A. Astrakhantsev, N. L. Ryabchenok, P. E. Ryabchenok. Published in the Official Bulletin «Inventions. Utility Models», 2000, № 36.

Information about the authors:

**Vorotilkin, Aleksey V.** – Vice-President of JSC Russian Railways, Moscow, Russia, Vorotilkinav@center.rzd.ru.  
**Mikhalechuk, Nikolai L.** – Deputy Head of the Directorate of traction (Development), branch of JSC Russian Railways, Moscow, Russia, Mihalchuknl@center.rzd.ru.  
**Ryabchenok, Natalia L.** – Ph.D. (Eng.), associate professor of Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, astranal@mail.ru.  
**Alekseeva, Tatiana L.** – Ph.D. (Eng.), associate professor of Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, talecseeva@rbcmail.ru.

Article received 16.11.2015, accepted 18.12.2015.

## ПАМЯТИ НАШЕГО КОЛЛЕГИ, ДРУГА И ТОВАРИЩА



Университетская общественность проводила в последний путь одного из наиболее уважаемых и замечательных представителей профессуры МИИТ, известного своими многочисленными научными трудами и многолетней педагогической деятельностью **Михаила Михайловича Болотина**. Он скоропостижно скончался 25 ноября с.г. на 74-м году жизни, полный творческих планов, окру-

женный массой дел и забот, которые касались и кафедральной работы, и предстоящих заседаний ученых советов, диссертационных защит и учебных программ, студенческих зачетов и экзаменов.

Постоянным объектом его внимания, это надо подчеркнуть особо, оставался и ведущий отраслевой научный журнал «Мир транспорта», членом редколлегии которого Михаил Михайлович был с первых дней существования издания. Профессор в немалой мере способствовал тому, чтобы журнал вошел в список ВАК, приобрел авторитет в научном мире, стал победителем во всероссийском конкурсе. Его собственные публикации всегда отличали высокий профессионализм, качественная аналитика, умение видеть и оценивать отраслевую перспективу.

Редакция, редакционная коллегия и редакционный совет «Мира транспорта» глубоко скорбят в связи с кончиной М. М. Болотина и выражают соболезнование семье и близким покойного, память о котором мы будем неизменно хранить, отдавая должное его трудам и заслугам.

## IN MEMORY OF OUR COLLEAGUE, FRIEND AND FELLOW

The university community paid last respects to one of the most respected and outstanding representatives of MIIT professors, famous for his numerous scientific works and years of teaching activities **Mikhail M. Bolotin**. He died suddenly on November 25 of this year in his 74<sup>th</sup> year of life, full of creative plans, surrounded by a mass of affairs and concerns, which related to the work of the department and upcoming meetings of academic councils, dissertation defenses and training programs, student tests and examinations.

Permanent object of his attention, it must be emphasized especially, remained a leading transport scientific journal «World of Transport and Transportation», a member of the editorial board of which Mikhail

Bolotin was from the first days of the existence of this edition. Professor contributed significantly to the fact that the journal was included in the list of Higher Attestation Commission, gained credibility in the scientific world, became a winner of the All-Russian contest. His own publications have always been distinguished by high professionalism, quality analytics, ability to see and evaluate the industry perspective.

*Editorial council, editorial board and editorial staff of «World of Transport and Transportation» are deeply in mourning because of the death of M. Bolotin and express condolences to the family and friends of the deceased, whose memory we will always keep, paying tribute to his work and merit.*

