

ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.331

**ВЫБОР РОДА ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
МОНГОЛИИ**

*Алтангэрэл ЭНХ-АМГАЛАН Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС, Инженер Локомотивного депо Улан-Батор, АО «УБЖД» Тел.: (+976) 86119909.
E-mail: enkhamgalan0203@gmail.com*

Аннотация. Рассмотрены опыт электрификации железных дорог России и обоснование выбор рода тока для электрификации железных дорог Монголии. Выполнен расчет максимальной массы состава вагонов грузовых поездов электровоза переменного тока 2ЭС5К и электровоза постоянного тока 2ЭС6 в условиях Транс-Монгольской магистраль Улан-Баторской железной дороги. Представлено обоснование выбор рода тока для электрификации железных дорог Монголии.

Ключевые слова: железная дорога, электрификация, рода тока, тяга, электровоз.

**THE CHOICE OF TYPE OF CURRENT FOR RAILWAY ELECTRIFICATION OF
MONGOLIA**

ENKH-AMGALAN Altangerel Omsk State Transport University (OSTU), 35 Marx av., Omsk, 644046, Russia, Graduate student of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU, Engineer of Locomotive depot of Ulaanbaatar, JSC Ulaanbaatar railway, Phone: (+976) 86119909. E-mail: amгаа_02_03@yahoo.com

Abstract. The experience of electrification of Railways in Russia and the rationale for the choice of the type of current for electrification of Railways in Mongolia are considered. The calculation of the maximum mass of freight train cars of the electric locomotive AC 2ES5K and DC electric locomotive 2ES6 in the conditions of the TRANS-Mongolian highway Ulan-Bator railway. Presents the rationale for the choice of type of power for the electrification of Railways of Mongolia.

Keywords: railway electrification, traction, locomotive, type of current.

В соответствии с Энергетической стратегией Монголии на период до 2010 года и на перспективу до 2040 года одним из перспективных направлений развития является повышение энергетической эффективности и ресурсосбережение.

Одним из важнейших вопросов при принятии решения об электрификации участка железной дороги или строительства новой электрифицированной линии является выбор рода тока. Исторически сложилось, что электрификация железных дорог на первом этапе осуществлялась на постоянном токе, что было обусловлено существовавшим в тот период уровнем развития науки и техники. В последующем стала широко применяться при электрификации железных дорог система переменного тока. В настоящее время доля систем тягового электроснабжения (далее СТЭ) постоянного и переменного тока на сети железных дорог мира примерно составляет 43% и 57% соответственно [1], а решение о выборе той или

иной системы для вновь электрифицируемых участков принимается с учетом рода тока смежных электрифицированных участков. В случае электрификации протяженных участков железных дорог, граничащих с участками постоянного и переменного тока, в последнее время применяют СТЭ переменного тока.

Мировой опыт применения различных систем электрической тяги постоянного и переменного тока однозначно свидетельствует о преимущественном использовании системы переменного тока промышленной частоты напряжением 25 кВ. Подтверждает это и многолетний опыт эксплуатации электрифицированных железных дорог России.

Так, капитальные затраты на электрификацию даже с учетом реконструкции линии связи при переменном токе на 15 - 18 % ниже, чем при постоянном. Число тяговых подстанции меньше в 2 - 3 раза, они существенно проще, в результате чего значительно ниже расходы на их техническое обслуживание. Легче контактная подвеска – экономия меди составляют более 2 т на 1 км. Полностью снимается проблема износа контактных проводов и их периодической замены, исключается электрокоррозия опор контактной сети и подземных сооружений.

Опыт Российских железных дорог показывает, что электрифицированные участки переменного тока имеют более высокую энергетическую эффективность, меньшие на 5 - 6 % суммарные потери энергии на тягу; на них практически не ограничивается весовая норма поездов. При равных объемах работы на участках переменного тока требуется на 15 - 20 % меньше локомотивов и локомотивных бригад. Повреждаемость устройств электроснабжения и ЭПС (с бесколлекторным приводом) также заметно ниже. В результате себестоимость перевозок на участках переменного тока почти на 20 % меньше, чем при электротяге постоянного тока.

Для каждой из названных систем тягового электроснабжения существует своя «ниша» по объему перевозок (на рис. 1 они заштрихованы), в которой перевозочный процесс реализуется с оптимальной энергетической эффективностью. Границы этих «ниш» зависят от многих факторов и прежде всего от стоимостных, но для каждого конкретного участка эти границы вполне определены. Далее показано, что эти границы связаны с обеспечением максимальной провозной способности электрифицируемого участка.

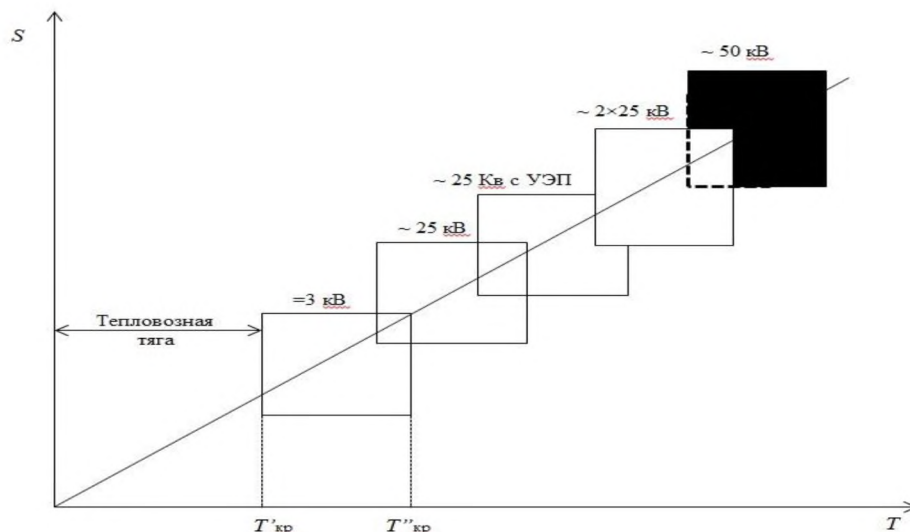


Рисунок 1. Зоны целесообразного применения различных систем тягового электроснабжения по условиям оптимальной энергетической эффективности:

$T'_{кр}$, $T''_{кр}$ – критический грузооборот, при котором целесообразен перевод соответственно с тепловозной тяги на электрическую и с постоянного тока на переменный; S – среднегодовое потребление электроэнергии на 1 км электрифицированной линии.

Энергетическая «гибкость» системы электроснабжения переменного тока была подтверждена в процессе ее реализации на Байкало-Амурской магистрали (БАМ). Спроектированная первоначально для БАМа система электроснабжения (2×25 кВ) была рассчитана на максимальные размеры перевозок; она оказалось избыточной при их спаде, что объясняется повышенными потерями энергии холостого хода в автотрансформаторах. Консервация автотрансформаторов и переход на систему 2×25 кВ с экранирующими и усиливающими проводами (ЭУ), в качестве которых используются провода системы 2×25 кВ, позволили оптимально согласовать по энергетическим показателям систему электроснабжения с грузонапряженностью участка. На постоянном токе таких возможностей нет [1].

Исходя из очевидных преимуществ электрической тяги переменного тока, не случайно в ряде стран начали переводить отдельные «старые» участки с постоянного тока на переменный (Франция, Индия и др.). Пример подала Россия, где впервые в мировой магистральном участке Транссибирской магистрали Зима – Слюдянка (длина 386 км), работающего в условиях высокой грузонапряженности. Уникальная технология перевода этого участка на переменный ток достойна внимания специалистов. Провода контактной сети переменного тока расположили на вновь установленных опорах.

Тяговые подстанции на постоянном токе размещаются на расстоянии 10 – 25 км одна от другой. Тяговые подстанции на переменном на расстоянии 40 – 60 км.

При условии, что тяговые подстанции будут расположены на расстоянии 20 км друг относительно друга выполним расчет ориентировочного количества тяговых подстанций при электрификации системы на постоянном токе УБЖД. Общая протяженность линий составляет 1100 км, тогда ориентировочное количество тяговых подстанций составит:

$$1110\text{км} : 20 \text{ км} = 55,5 \approx 56 \text{ шт} \quad (1)$$

При условии, что тяговые подстанции будут расположены на расстоянии 50 км друг относительно друга выполним расчет ориентировочного количества тяговых подстанций при электрификации системы на переменном токе УБЖД. Общая протяженность линий составляет 1100 км, тогда ориентировочное количество тяговых подстанций составит:

$$1110\text{км} : 50 \text{ км} = 22,2 \approx 22 \text{ шт} \quad (2)$$

Схема УБЖД с указанием мест расположения тяговых подстанций в случае электрификации на переменном токе. Так в результате электрификации на токе потребуется в 2,5 раза меньшее количество тяговых подстанций. Более высокое напряжение в контактной сети и соответственно меньшие токи позволяют увеличить расстояние между тяговыми подстанциями. Однако необходимость подачи на тяговые двигатели постоянного тока приводит к удорожанию электроподвижного состава из-за установки тяговых трансформаторов и выпрямителей.

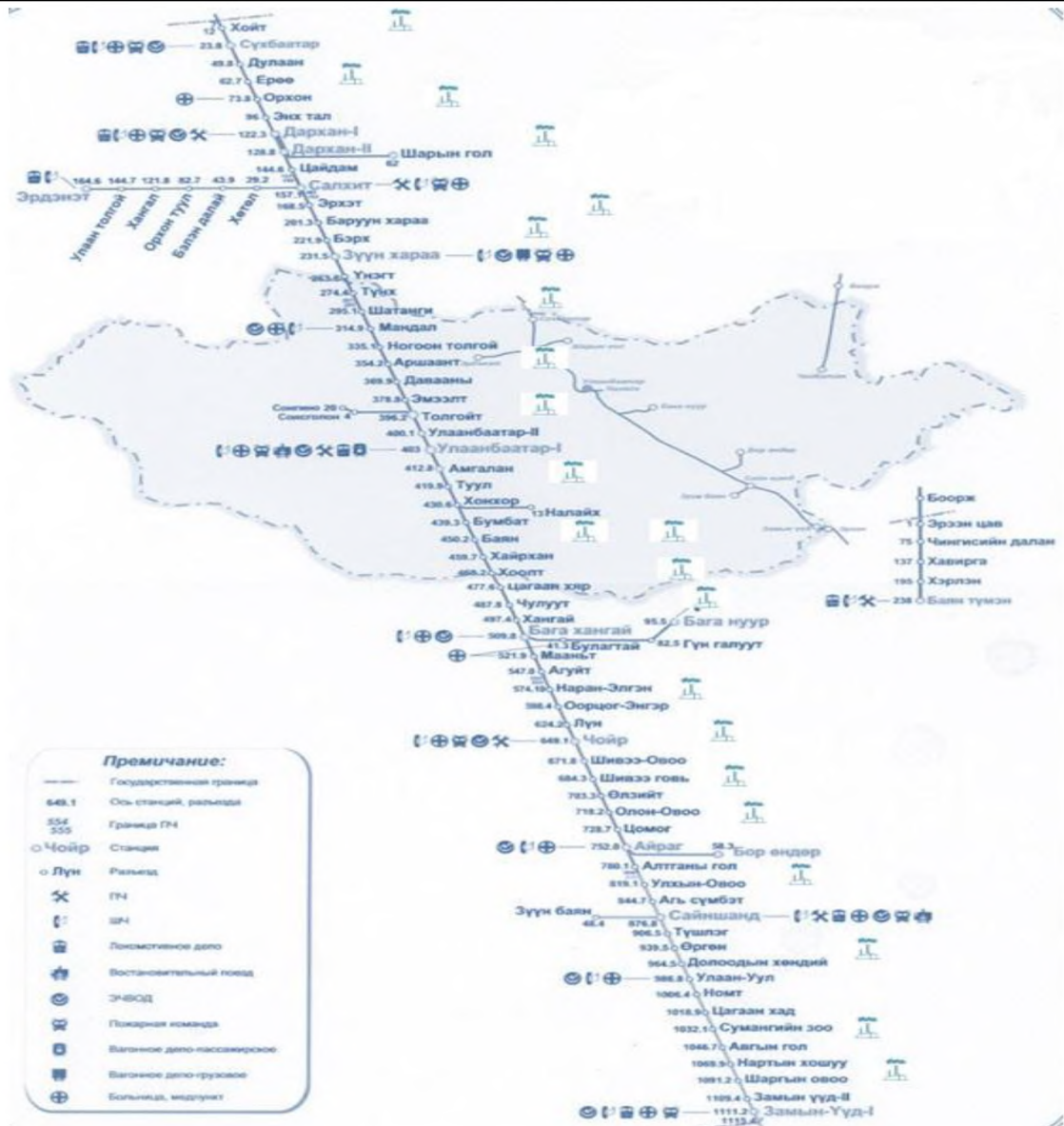


Рисунок 2. Схема УБЖД с указанием мест расположения тяговых подстанций в случае электрификации на переменном токе

Постоянное повышение надежности и экономичности работы устройств электроснабжения на действующих грузонапряженных электрифицированных линиях, своевременное оптимальное изменение параметров устройств в соответствии с нуждами перевозочного процесса – важнейшие задачи как эксплуатационного персонала всех уровней, так и отраслевой науки.

Электрифицированная железная дорога является частью общегосударственного электроэнергетического комплекса и, естественно, подчиняется общим законам его развития. Одно из основных направлений технического прогресса в энергетике – поэтапное повышение ступеней напряжения. Чем выше напряжение линии электропередач, тем выше ее технико-экономические показатели. Это положение справедливо и для тяговых сетей электрифицированных железнодорожных участков.

Анализ показателей работы УБЖД свидетельствует о том, что объемы перевозок ежегодно возрастают (рисунок 3 – 4), при этом средняя масса поезда также увеличивается. Исходя из существующей тенденции, для освоения возросшего объема перевозок через 5 лет, т. е. в 2022 году, среднюю массу поезда потребуется увеличить до 4700-5200 т. Вождение

поездов такой массы используемые на УБЖД в настоящее время тепловозы серии 2ТЭ116УМ и 2М62 не смогут обеспечить из-за недостаточной мощности и силы тяги.

Возможно применение сдвоенной тяги для вождения поездов большой массы, однако при этом значительно возрастают эксплуатационные расходы на тепловозную тягу в основном из-за увеличения расхода топливно-энергетических ресурсов [2].

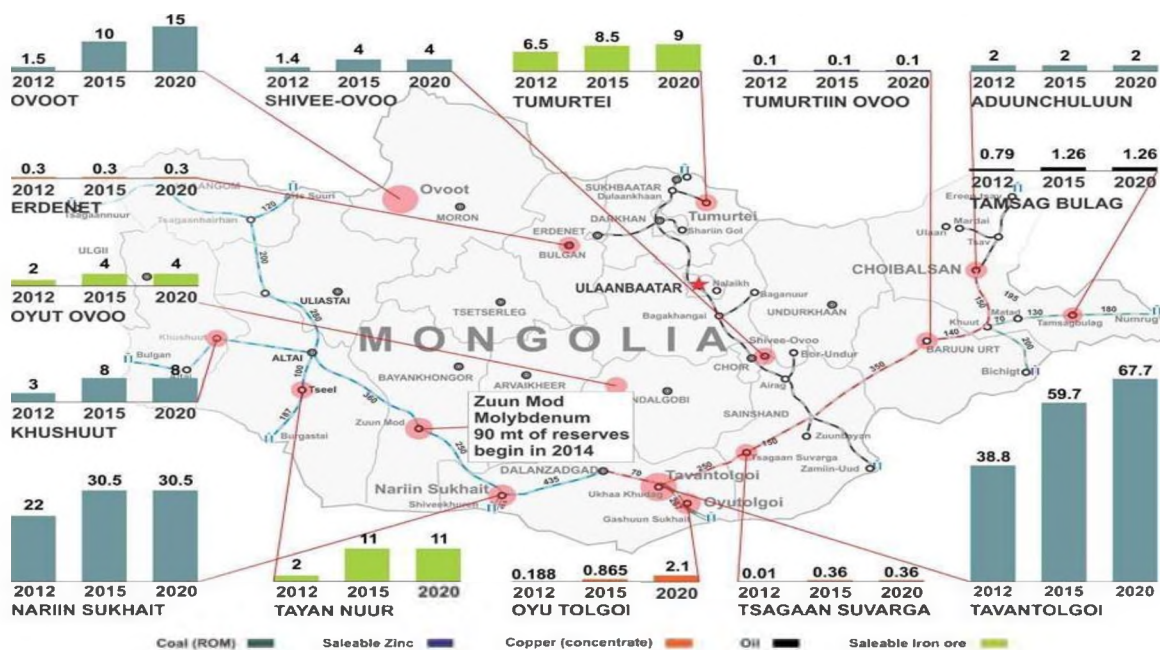


Рисунок 3. – Планируемые внутренние объемы перевозок железнодорожным транспортом добывающей отрасли Монголии

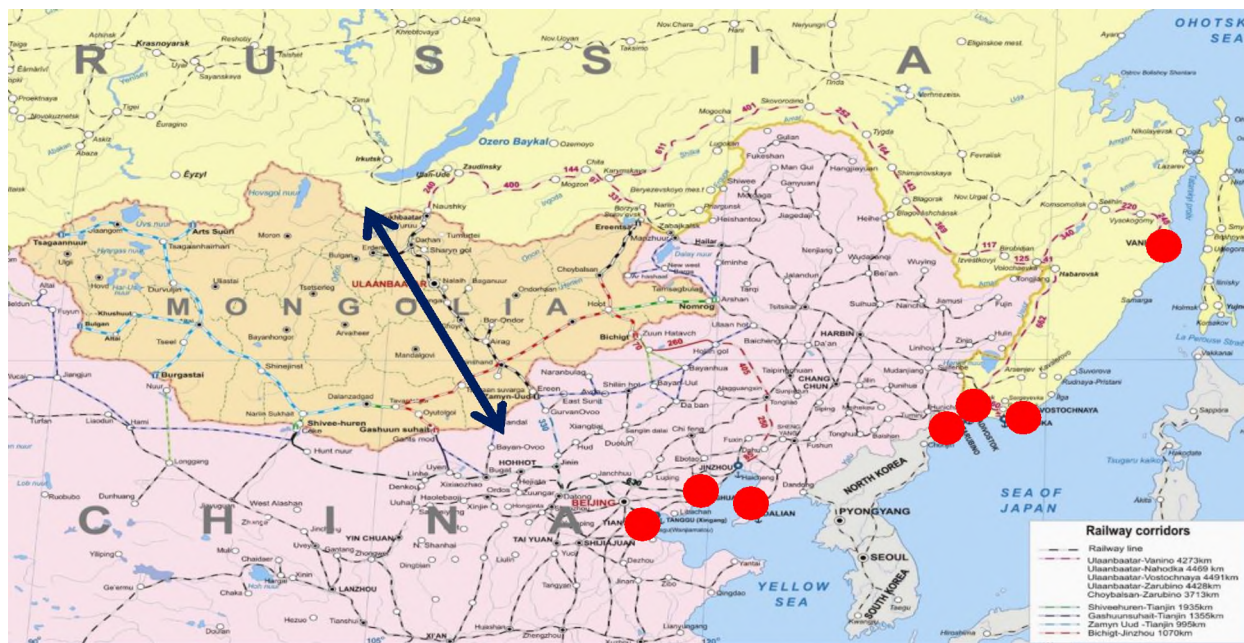


Рисунок 4. – Схема экспортных направлений перевозки железнодорожным транспортом

Исходя из проведенного анализа мирового опыта электрификации эффективность применения участков переменного тока выше, чем на постоянном токе. Однако требуется выполнить научное обоснование выбора рода тока применительно к УБЖД. Для этого необходимо выполнить ряд тяговых и электрических расчетов исходя из реальных условий и

особенностей Улан-Баторской железной дороги. В качестве примера в диссертации рассматривается участок с самым сложным профилем пути Улан-Батор – Зуунхараа. Расчеты по данному участку окажутся лимитирующими в плане мощности тягового подвижного состава, а также параметров системы тягового электроснабжения. По примеру самого сложного участка требуется рассчитать необходимые условия при работе и на других участках УБЖД.

Тяговое плечо Улан-Батор – Зуунхараа (рисунок 5) общей длиной 173 км имеет холмистый (перевалистый) профиль пути с подъемами крутизной до 15-17 ‰ на перегоне Толгойт – Эмээлт и спусками крутизной до 10-11 ‰ в нечетном направлении. При этом общая длина затяжного подъема, расположенного в начале тягового плеча, составляет около 20 км, а на остальной части тягового плеча расположен затяжной спуск длиной около 150 км. В четном направлении тягового плеча Зуунхараа – Улан-Батор расположены преимущественно подъемы крутизной до 10-11 ‰ общей длиной около 150 км спуски большой крутизны до 15-17 ‰. Спрямленный и приведенный профиль пути тягового плеча Улан-Батор – Зуунхараа представлен на рисунке 5.

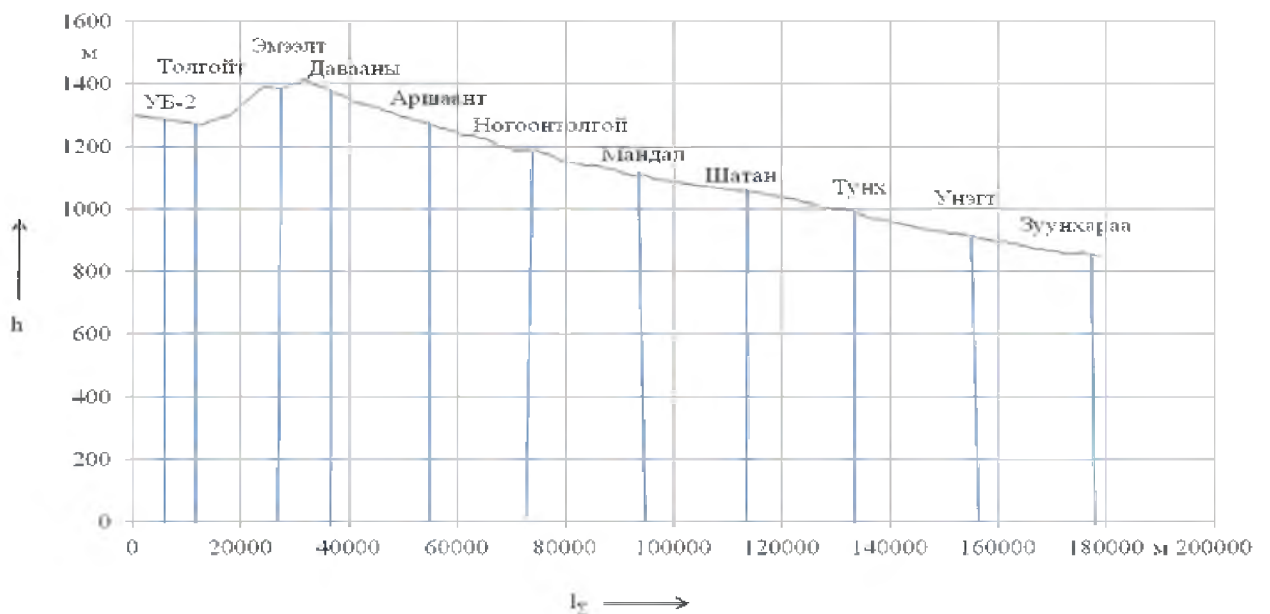


Рисунок 5. – Профиль пути тягового плеча Улан-Батор – Зуунхараа

Режим движения поезда на спусках зависит от их крутизны и протяженности, но в любом случае скорость движения на них не должна превышать максимально допустимую. На коротких спусках сравнительно небольшой крутизны i , которая меньше или равна сумме удельного основного сопротивления движению поезда w_0 и дополнительного сопротивления движению от кривых w_r , т. е. $|i| \leq (w_0 + w_r)$, целесообразно использовать режим выбега. На спусках большой крутизны и длины при $|i| > (w_0 + w_r)$, как правило, необходимо использовать режим торможения, при этом рациональным является режим электрического торможения, позволяющий поддерживать максимально допустимую скорость движения. Ко всему прочему рекуперативное торможение обеспечивает значительную экономию электроэнергии. Расчетные и экспериментальные данные показывают, что за счет применения рекуперативного торможения грузовых поездов массой 3000 т и более на участках с холмистым профилем пути, имеющих протяженные уклоны крутизной до 17 ‰, экономия электроэнергии может достигать 20-30 % и более [3].

Для оценки эффективности применения электрической тяги на участке Улан-Батор-Зуунхараа выполнены тяговые расчеты с учетом Правил тяговых и тормозных расчетов [3-6] с помощью компьютерной программы КОРТЕС [7].

Расчеты выполнены для безостановочного движения грузовых поездов с электровозами 2ЭС5К и 2ЭС6 с установленной скоростью на перегонах и главных путях станций, с минимальным временем хода по участкам с ограничением скорости, с максимальным применением электрического рекуперативного торможения, при нормальных метеорологических условиях.

Параметры и характеристики электровозов 2ЭС5К и 2ЭС6 приняты согласно техническим данным при напряжении на токоприемнике 3000 В и 25000 В и диаметре колес 1250 мм [3, 8].

Расчетные кривые движения грузовых поездов массой 4500 т с электровозом 2ЭС5К переменного тока в нечетном и в четном направлениях на участке Улан-Батор – Зуунхараа приведены на рисунке б – а, б. Расчетные кривые движения грузовых поездов массой 4500 т с электровозом 2ЭС6 постоянного тока в нечетном и в четном направлениях на участке Улан-Батор – Зуунхараа приведены на рисунке б – в, г.

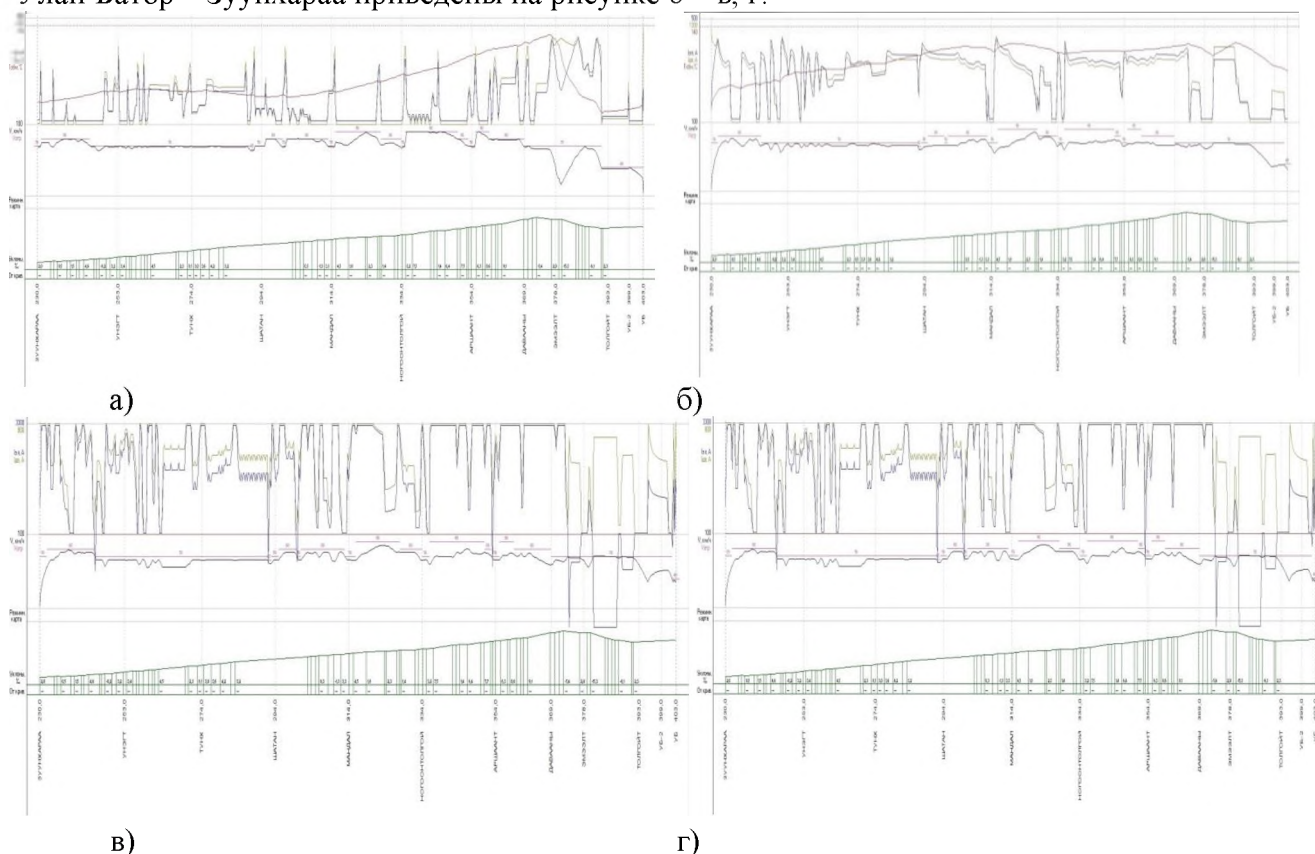


Рисунок 6. – Расчетные кривые движения грузовых поездов

а – переменного тока массой 4500 т с электровозом 2ЭС5К в нечетном направлении на участке Улан-Батор-Зуунхараа; б – переменного тока массой 4500 т с электровозом 2ЭС5К в четном направлении на участке Улан-Батор-Зуунхараа; в – постоянного тока массой 4500 т с электровозом 2ЭС6 в нечетном направлении на участке Улан-Батор-Зуунхараа (с подталкиванием ст. Толгойт-Давааны); г – постоянного тока массой 4500 т с электровозом 2ЭС6 в четном направлении на участке Зуунхараа-Улан-Батор.

На этих рисунках показаны отдельные пункты, крутизна i спрямленных и приведенных элементов профиля пути участка, допускаемая и фактическая скорость движения поезда V , ток тягового двигателя $I_{дв}$, потребляемый из контактной сети в режиме

тяги ток электровоза $I_{эл}$, температура нагрева обмоток тягового двигателя $T_{обм}$. Из кривых движения видно, что максимальная скорость поезда достигает 90 км/ч, максимальный ток тягового двигателя не превышает 1300 А, максимальный нагрев тягового двигателя не превышает 130 °С. Анализ расчетных кривых показывает, что использование системы переменного тока позволит везти поезд общим весом 4500 т, а в случае системы постоянного тока работы с весом поезда 4500 т возможно лишь при использовании подталкивающего локомотива.

Кривые тока электровоза $I_{эл}$ переменного тока, потребляемого из контактной сети в режиме тяги и возвращаемого в режиме рекуперативного торможения на участке Улан-Батор – Зуунхараа в нечетном направлении с грузовыми поездами массой 3000-4500 т максимальный ток электровоза в режиме тяги на перегоне Толгойт – Эмээлт с лимитирующим подъемом крутизной 16...17 ‰ достигает 320-350 А, а в режиме рекуперативного торможения на спусках крутизной до -8...-9 ‰ достигает -70...-110 А. На участке Зуунхараа – Улан-Батор в четном направлении с грузовыми поездами массой 3000-4500 т максимальный ток электровоза в режиме тяги с лимитирующими подъемами крутизной 8...9 ‰ достигает 300-330 А, а в режиме рекуперативного торможения на спусках крутизной до -16...-17 ‰ достигает -150...-180 А. Таким образом, кривые тока $I_{эл}$ электровоза постоянного тока, потребляемого из контактной сети в режиме тяги на участке Улан-Батор – Зуунхараа в нечетном направлении при движении с грузовыми поездами массой 3000 – 4500 т максимальный ток электровоза в режиме тяги на перегоне Толгойт-Эмээлт с лимитирующим подъемом крутизной 16...17 ‰ достигает 3000 – 4800 А. На участке Зуунхараа-Улан-Батор в четном направлении с грузовыми поездами массой 3000 – 4500 т максимальный ток электровоза в режиме тяги с лимитирующими подъемами крутизной 8...9 ‰ достигает 5500 – 6400 А. Такое расхождение токов обусловлено разной протяженностью подъемов лимитирующей крутизны: в четном направлении лимитирующий подъем составляет 140 км, в нечетном – 30 км.

Результатирующие энергетические показатели движения грузовых поездов с электровозами 2ЭС5К приведены в таблице 1. В этой таблице указаны масса состава m_c , техническая скорость V_t , потребление электроэнергии в режиме тяги $A_{эт}$, возврат электроэнергии в режиме рекуперативного торможения $A_{эп}$, результирующий расход электроэнергии на тягу $A_э$, удельный расход электроэнергии на тягу $a_э$, коэффициент возврата электроэнергии $\beta_{эп}$. Значения показателей V_t , $A_э$, $a_э$ и $\beta_{эп}$ рассчитаны по формулам (1 – 4):

$$V_t = L/T; \quad (1)$$

$$A_э = A_{эт} - A_{эп}; \quad (2)$$

$$a_э = \frac{A_э \cdot 10^4}{m_c L}; \quad (3)$$

$$\beta_{эп} = \frac{A_{эп} \cdot 100}{A_{эт}}. \quad (4)$$

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением массы поезда удельный расход электроэнергии на тягу снижается. Объясняется это в основном тем, что удельный расход электроэнергии на тягу обратно пропорционален массе поезда, кроме того при увеличении массы поезда возрастает возврат электроэнергии в режиме рекуперативного торможения. Поэтому с целью снижения энергозатрат на тягу целесообразно увеличивать массу поездов и максимально применять электрическое рекуперативное торможение, при котором на спусках поддерживается наибольшая скорость движения, близкая к допустимой.

При переменном токе на участке Улан-Батор – Зуунхараа в нечетном направлении для движения поездов массой свыше 4600 т требуется подталкивание или распределенная (кратная) тяга. При этом в расчетах предусмотрено равномерное распределение нагрузки между электровозами и секциями. На участке Зуунхараа – Улан-Батор в четном направлении для движения поездов массой свыше 5300 т также требуется подталкивание или распределенная (кратная) тяга. При этом в расчетах предусмотрено равномерное распределение нагрузки между электровозами и секциями.

На тяговом плече Улан-Батор – Зуунхараа в нечетном направлении выработанная тяговыми двигателями электровоза при рекуперативном торможении электрическая энергия $A_{эп}$ составляет 46 – 52 %.

При постоянном токе на участке Улан-Батор – Зуунхараа в нечетном направлении для движения поездов массой свыше 3500 т требуется подталкивающий локомотив или распределенная (кратная) тяга. При этом в расчетах предусмотрено равномерное распределение нагрузки между электровозами и секциями. На участке Зуунхараа – Улан-Батор в четном направлении для движения поездов массой свыше 3000 т также требуется подталкивающий локомотив или распределенная (кратная) тяга.

Таблица 1. – Результирующие энергетические показатели движения грузовых поездов при переменном токе на тяговом плече Улан-Батор–Зуунхараа

Тяговое плечо, длина	Электровоз	m_c , т	V_t , км/ч	$A_{эт}$, кВт.ч	$A_{эп}$, кВт.ч	$A_{э}$, кВт.ч	$a_{э}$, кВт.ч/ 10^4 .км	$\beta_{эп}$, %
Улан-Батор-Зуунхараа 173 км	2ЭС5К	3000	67,5	3271	1036,9	2234,1	43,0	31,7
		4500	64,8	4544,3	1552,4	2991,9	57,6	34,2
Зуунхараа Улан-Батор 173 км	2ЭС5К	3000	69,3	9774,3	382,6	9391,7	181,0	3,9
		4500	65,4	14445,4	481,2	13238	255,1	3,4

Результирующие энергетические показатели движения грузовых поездов с электровозами 2ЭС6 приведены в таблице 2. Если предположить, что электровозом постоянного тока 2ЭС6 можно провести грузовые поезда такой же массы, как и электровозом 2ЭС5К, и с такой же средней скоростью, то получим энергетические показатели, приведенные в таблице 2. В этой таблице указаны масса состава m_c , техническая скорость $V_t = L/T$, потребление электроэнергии в режиме тяги $A_{эт}$, удельный расход электроэнергии a_t .

Таблица 2. – Результирующие энергетические показатели движения грузовых поездов при постоянном токе на тяговом плече Улан-Батор – Зуунхараа

Тяговое плечо, длина	Электровоз	m_c , т	V_t , км/ч	$A_{эт}$, кВт.ч	$A_{эп}$, кВт.ч	$A_{э}$, кВт.ч	$a_{э}$, кВт.ч/ 10^4 т.км	$\beta_{эп}$, %
Улан-Батор-Зуунхараа 173 км	2ЭС6	3000	65,3	3933,9	1350,6	2583,3	49,8	34,3
		4500 (с толкачом)	65,0	6257	2401,8	3855,2	74,3	38,3
Зуунхараа Улан-Батор 173 км	2ЭС6	3000	68,3	11387,4	665,8	10721,6	206,6	5,8
		4500	65,6	16095,4	1130,6	14964,8	288,3	7

Сравнение данных таблиц 1 и 2 показывает, что при вождении одинаковых поездов в одних и тех же эксплуатационных условиях энергозатраты при постоянном токе на 660 – 1700 кВт.ч выше, чем при переменном токе.

Список литературы

1. Бакланов А.А. Теория электрической тяги. Тяговые расчеты: Методические указания по курсовому и дипломному проектированию. Омск: ОмГУПС, 1999. 39 с.
2. Временные методические указания по обеспечению безопасности движения грузовых поездов повышенного веса и длины. Утверждены Ц Фадеевым Г.М. 09.06.1996 г. № ЦД-ЦТ-ЦЛ-4805.
3. Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенного веса на участках обслуживания локомотивных эксплуатационных депо Кузбасского отделения Западно-Сибирской ж.д. от 25.12.2008 г., утвержденная НОД-3 А.А. Фомичевым.
4. Котельнико, А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы [Текст] / А. В. Котельнико. – М.: Интекст, 2002. – 104 с.
5. Комплекс расчетов тягового электроснабжения КОРТЭС. М.: ВНИИЖТ, 2011.
6. Отчет 2014 г. Монголо-Российское акционерное общество Улан-Баторская железная дорога. – М.: Ганзам пресс, 2014 – 232 с.
7. Осипов С. И., Осипов С. С., Феоктистов В. П. Теория электрической тяги. М.: Маршрут, 2006. 434 с.
8. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985. 287 с.

References

1. Baklanov A. A. The theory of electric traction. Traction calculations: Methodological guidelines for course and diploma projecting. Omsk: OmGUPS, 1999. 39 p.
2. Temporary guidelines for ensuring the safety of freight trains of increased weight and length. Approved by G. M. Fadeev. 09.06.1996. № ЦД-ЦТ-ЦЛ-4805.
3. Instruction on the organization of handling of freight trains of increased weight in the areas of servicing the locomotive operating depots of the Kuzbass Branch of the West Siberian Railroad. dated 25.12.2008, approved by the GCD-3 A. A. Fomichev.
4. Kotelnikov A. V. Electrification of the railways. Global trends and prospects [Elektrifikaciy jeleznihih dorog. Mirovie tendentsi i perspektivi]. Moscow, 2002, 104 p.
5. Complex of calculations of traction power supply of KORTES. Moscow: VNIIZhT, 2011.
6. Repoprtr of 2014 Mongolian-Russian Joint Stock Company Ulaanbaatar Railway. M.: Ganzam press, 2014 – 232 p.
7. Osipov S. I, Osipov S. S, Feoktistov V. P. Theory of electric traction. M .: Route, 2006. 434 p.
8. Rules of traction for train work. M .: Transport, 1985. 287 p.