

Сычев В. А., к. т. н., доцент,
главный редактор Международных информационных
научно-технических журналов «Локомотив-информ» и «Вагонный парк»,
вице-президент Корпорации «Техностандарт» (г. Харьков)

Экономический анализ видов локомотивной тяги. Анализ и недостатки исследований эффективности локомотивной тяги

Исследования эффективности тепловозной и электрической тяги в условиях ограниченных ресурсов лежат в основе решения о закупке новых электровозов или модернизации тепловозов и поэтому являются крайне необходимыми и актуальными. Тепловозы уже длительное время являются основным видом тягового подвижного состава. С середины прошлого века началась массовая электрификация железных дорог, которая продолжается сегодня и запланирована на ближайшее будущее. Чем не устраивают нас тепловозы сегодня? Во многих случаях ответ на этот вопрос простой: электротяга эффективнее теплотяги. Однако такое утверждение лишено смысла до тех пор, пока не будет назван показатель (критерий эффективности), по величине которого проводилось сравнение.

Если выбранный критерий окажется недостаточно общим, то в результате сравнения можно получить любой желаемый результат. В некоторых расчетах указано, что затраты на энергоносители в теплотяге в 5–6 раз больше, чем в электротяге. Другие расчеты показывают, что удельный расход топлива при тепловозной тяге в 1,5–1,7 раза больше, чем при электрической, а электрификация дороги позволит снизить расходы на обслуживание тяги на 40% [1].

Учитывая важность вопроса, попробуем разобраться, действительно ли электротяга эффективнее теплотяги и в какой степени приведенные выше и другие показатели эффективности соответствуют действительности.

Во-первых, расход энергоносителя на единицу работы зависит не только от качеств машины, но и от условий ее эксплуатации. Мы же в общую графу «теплотяга» (или «электротяга») вносим без разбора весь имеющийся в наличии подвижной состав. Не нужно доказывать, что при другой номенклатуре подвижного состава будет получен и другой результат. Мало того, мы пытаемся сравнивать тепловозы и электровозы, которые работают на разных дорогах, на разных линиях, с составами разного веса и с разной осевой нагрузкой, при разной организации работы и разным техническом состоянии подвижного состава и пути. Следуя такой логике, можно легко доказать, и не на бумаге, а опытным путем, что самый хороший электровоз по расходу энергоносителя на единицу работы хуже самого плохого паровоза. Для этого к электровозу нужно прицепить один вагон, а к паровозу — такой состав, какой он в состоянии потянуть, и пусть каждый из них перевозит свой груз. При этом желательно, чтобы электровоз двигался все время на подъем, да еще с ограничением скорости из-за состояния пути, а паровоз с составом на другом направлении пусть катится под горку. Нет сомнения, что в этом случае по выбранному показателю паровоз будет более эффективным.

Во-вторых, при пересчете расхода электроэнергии в условное топливо принимают, что энергию для электротяги получают с удельным расходом топлива 0,325 кг у.т. / (кВт·ч), что соответствует КПД 37,8%. Однако наши электростанции не так хорошо работают, как показывают расчеты. На самом деле КПД тепловых электростанций в лучшем случае составляет 33–35%. Кроме того, имеются потери электроэнергии в различных элементах системы электроснабжения электровозов. Как минимум, нужно учитывать потери на повышающих подстанциях, в линиях электропередач, на тяговых подстанциях. Если возьмем средние значения КПД названных элементов, получим действительный КПД по выработке электроэнергии для электротяги — 0,288, что соответствует удельному расходу условного топлива — 0,427 кг у.т. / (кВт·ч) вместо 0,325.

Таким образом, при оценке видов тяги допускают двойную ошибку. Первая из них заключается в том, что сравнивают показатели, которые нельзя сравнивать из-за метода их получения. Вторая ошибка заложена в пересчете единиц измерения без учета реальностей.

Для устранения первой ошибки нужно проведение специальных сравнительных испытаний, что требует значительных затрат времени и средств. Результатов таких испытаний с современным подвижным составом нет, поэтому ничего не остается, как пользоваться фактическими данными эксплуатации.

Для устранения второй ошибки нужно правильно пересчитывать фактические данные, при этом расход условного топлива для электротяги переведен в расход электроэнергии (с учетом 0,325 кг у.т. / (кВт·ч)), а затем вновь в расход условного топлива, но с учетом действительного значения удельного расхода условного топлива — 0,427 кг у.т. / (кВт·ч).

Таким образом, по расходам энергоносителей никакого преимущества электротяги по сравнению с теплотягой на самом деле нет. Этому преимуществу неоткуда взяться, потому что природу не обманешь. Затраты на энергоносители значительно больше у теплотяги (в 3,3–4,2 раза). Однако ни достоинства электровозов, ни недостатки тепловозов здесь решающего значения не имеют, поскольку это определяется действующими ценами на энергоносители. В данном случае важны не столько сами цены, сколько их соотношение, а в последние годы в соотношении цен на различные энергоносители имеется явная диспропорция. По ценам на электроэнергию и дизтопливо имеется диспропорция в 3,9 раза.

Если исходить из современных реалий, то по рассмотренным выше показателям (расход энергоносителей и затраты на них) электротяга в сравнении с теплотягой существенно выигрывает по затратам на энергоносители. Однако в этих двух показателях не может учитываться весь спектр различий видов тяги. Для объективного сравнения видов тяги необходим более емкий критерий эффективности. В нем следовало бы учесть в первую очередь, что электротяга требует значительных капиталовложений в электрификацию дорог. Основными составляющими капиталовложений являются затраты на опоры контактной сети, их установку и на сооружение тяговых подстанций.

Одним из наиболее общих критериев эффективности для сравнения различных вариантов технических решений в последнее время принято считать «стоимость жизненного цикла». В этом критерии можно учесть указанные выше и другие отличия видов тяги. Однако этот критерий у нас только начинает

использоваться применительно к железнодорожному транспорту. Вместе с тем имеются основательные расчеты по сравнению теплотяги и электротяги, которые базируются на суммарных затратах, учитывающих и капвложения, и эксплуатационные расходы, и затраты в смежные отрасли. Этим расчетам уже много лет, и хотя цены, тарифы и их соотношения сейчас изменились, эксплуатируется другой подвижной состав, суть результатов таких расчетов не может измениться, и она заключается в следующем.

При одних условиях эксплуатации выгоднее (по суммарным затратам) использовать теплотягу, при других — электротягу. Основными влияющими факторами являются грузонапряженность линии, трудность профиля пути, существующие цены (на топливо, электроэнергию, материалы). Например, электротяга становится выгоднее теплотяги при грузонапряженности линии от 5 до 60 млн т·км / км (в зависимости от других факторов). Срок окупаемости капвложений в электрификацию дороги может составлять на разных грузонапряженных участках от 6 до 60 лет.

Вместе с тем затраты на энергоносители для теплотяги, которые продолжают расти из-за роста стоимости дизтоплива, хотелось бы снизить. В перспективе нефтепродукты будут только дорожать, поэтому выход — в использовании альтернативных видов топлива. Из них наиболее реальным на сегодня для использования на тепловозах представляется природный газ, который к тому же является самым дешевым энергоносителем. На автомобилях много лет успешно применяется сжатый и сжиженный газ, газотепловозы уже функционируют в России, США, Германии, Канаде, Австрии.

Если учесть, что затраты на топливо для газотепловоза меньше затрат на электроэнергию для электротяги (даже с учетом повышения стоимости природного газа), то использование теплотяги на природном газе будет вдвойне выгоднее электрификации дорог. Создание газотепловозов и систем их заправки тоже требует капвложений. Если эти капвложения будут не очень значительными, то может оказаться, что газотепловозы будет выгоднее использовать вместо электротяги даже на линиях, которые уже электрифицированы. Однако обоснование этого предположения требует тщательных технико-экономических расчетов.

Модернизацию имеющегося парка тепловозов для работы на природном газе можно рассматривать как вариант, который позволит обойтись минимальными вложениями в модернизацию и можно утверждать без расчетов, что использование модернизированных газотепловозов будет гораздо выгоднее не только дальнейшей электрификации дорог, но и выгоднее применения электротяги на уже электрифицированных линиях.

Воспользовавшись методикой расчета стоимости энергоносителя для производства необходимой силы тяги на ободе колеса локомотива (без учета затрат на создание и поддержание необходимой инфраструктуры), можно определить среднеэксплуатационный КПД видов тяги (тепло-, электротяга) как отношение работы в тепловых единицах, затраченной собственно на тягу (на ободе колес локомотива), к теплоте, выделяемой используемым энергоносителем. При этом учитываются все стадии производства и передачи энергии — от покупки топлива до получения силы тяги на ободе колеса локомотива.

Применение метода сравнительного анализа экономической целесообразности использования различных теплоносителей (с учетом стоимости инфраструктуры) и общий подход к определению условий и расчету сроков окупаемости электрификации железнодорожного участка позволило провести следующие математико-экономические расчеты.

Сравнение КПД тепловозной и электровозной тяги

1. Среднеэксплуатационный КПД электровозной тяги.

Функциональная схема электрической тяги на постоянном токе представлена на рис. 1.

Данная схема раскрывает основные недостатки электрической тяги — ее неавтономность и очень большие капитальные затраты на электрификацию железных дорог.

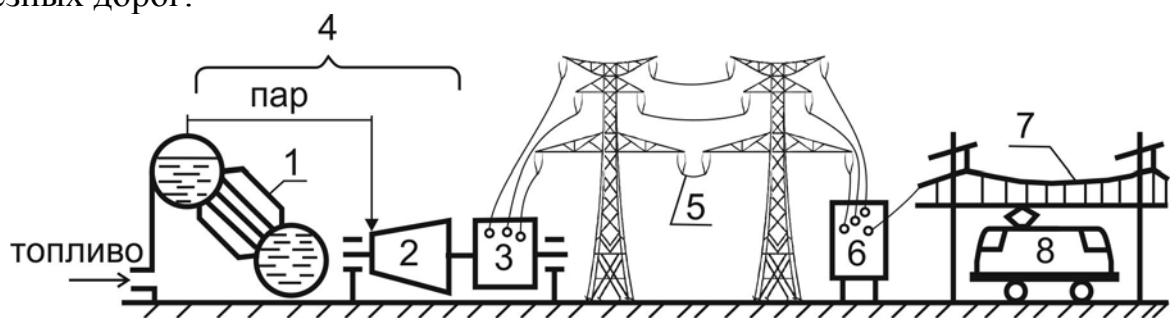


Рис. 1. Функциональная схема электрической тяги:

1 — котел; 2 — паровая турбина; 3 — генератор; 4 — конденсационная тепловая электростанция; 5 — линия электропередачи (ЛЭП-110); 6 — тяговая подстанция, понижающая напряжение ЛЭП до рабочей величины 3 000 В; 7 — контактная сеть; 8 — электровоз

КПД электрической тяги зависит от источника электроэнергии: чем выше КПД электростанции, тем выше КПД электрической тяги. Конденсационная электростанция (КЭС) — тепловая паротурбинная электростанция, назначение которой — производство электрической энергии с использованием конденсационных турбин. На КЭС применяется органическое топливо: твердое топливо, преимущественно уголь разных сортов в пылевидном состоянии, газ, мазут и т. п. Тепло, выделяемое при сжигании топлива, передается в котельном агрегате (парогенераторе) рабочему телу, обычно — водяному пару. КЭС, работающую на ядерном горючем, называют атомной электростанцией, или конденсационной АЭС. Тепловая энергия водяного пара преобразуется в конденсационной турбине в механическую энергию, а последняя в электрическом генераторе — в электрическую энергию. Отработавший в турбине пар конденсируется, конденсат пара перекачивается сначала конденсатным, а затем питательными насосами в паровой котел (котлоагрегат, парогенератор). Таким образом создается замкнутый пароводяной тракт: паровой котел с пароперегревателем — паропроводы от котла к турбине — турбина — конденсатор — конденсатный и питательные насосы — трубопроводы питательной воды — паровой котел.

Наибольшим КПД обладают гидроэлектростанции, а наименьшим — атомные электростанции. Например, в России около 80% электроэнергии вырабатывают тепловые электростанции, на долю же гидро- и атомных станций приходится около 20% выработанной энергии [2, 3].

С учетом энергетической эффективности процесса производства и передачи энергии КПД электрической тяги $\eta_{ЭТ}$ может быть представлен следующим произведением:

$$\eta_{ЭТ} = \eta_{ЭС} \cdot \eta_{ЛЭП} \cdot \eta_{ТП} \cdot \eta_{КС} \cdot \eta_{ЭВ} \cdot \beta_{ЭВ} = 0,17, \quad (1)$$

где $\eta_{ЭС} = 0,30$ — КПД электростанции (конденсационной);

$\eta_{ЛЭП} = 0,90$ — КПД линий электропередач;

$\eta_{ТП} = 0,94$ — КПД тяговой подстанции;

$\eta_{КС} = 0,92$ — КПД контактной сети;

$\eta_{ЭВ} = 0,77$ — среднеэксплуатационный КПД электровоза;

$\beta_{ЭВ} = 0,95$ — коэффициент учета затрат на собственные нужды электровоза.

Среднеэксплуатационные значения используемых коэффициентов взяты на основе анализа и обобщения многолетнего опыта эксплуатации ТПС с учетом затрат на поддержание технического состояния всех составляющих [4, 5].

2. Среднеэксплуатационный КПД тепловозной тяги $\eta_{ТТ}$ зависит от характеристик двигателя, величины затрат на собственные нужды и производительности электропередачи:

$$\eta_{ТТ} = \eta_{Д} \cdot \eta_{ЭП} \cdot \beta_{ТВ} = 0,26, \quad (2)$$

где $\eta_{Д} = 0,36$ — КПД двигателя, подсчитанный по среднесетевой гистограмме режимов грузовых перевозок;

$\eta_{ЭП} = 0,83$ — КПД электрической передачи;

$\beta_{ТВ} = 0,86$ — коэффициент учета затрат на собственные нужды тепловоза.

Таким образом, энергетическая эффективность тепловозной тяги по сравнению с электровозной выше более чем в 1,5 раза:

$$\frac{\eta_{ТТ}}{\eta_{ЭТ}} = 1,53. \quad (3)$$

Полученное соотношение КПД тепловой и электрической тяги подтверждается и результатами, полученными д. т. н., проф. В. А. Федорцом. Данные результаты объясняют, почему, например, в США только 0,2% железных дорог электрифицированы, доля электровозов в локомотивном парке составляет всего 4%, а налоговая политика государства ограничивает развитие электротяги.

Таким образом, коэффициент полезного действия тепловозной тяги более чем в 1,5 раза выше электровозной.

Сравнительный анализ экономических показателей электро- и теплотягового подвижного состава, математико-экономические расчеты преимуществ различных вариантов модернизации позволяют сделать следующие выводы.

Электрификация привлекательна с экологической точки зрения, меньше удельные расходы топлива и расходы на содержание эксплуатационного парка электровозов. К минусам относится то, что 100-процентная электрификация потребует вложения значительных средств.

Детальный расчет стоимости электрификации железных дорог многократно выполнялся в ОАО «РЖД». Расчеты показывают, что электротяга окупается, если приведенные к 1 т·км грузооборота расходы на создание и содержание системы электроснабжения железной дороги не меньше приведенной к 1 т·км величины экономии средств (на энергоносители и др.), полученной в результате отказа от тепловой и перехода на электрическую тягу.

Математико-экономические расчеты показывают, что модернизация изношенного локомотивного парка обладает преимуществами перед внедрением электрификации при условии, когда приведенные к 1 т·км затраты на содержание системы электроснабжения не менее величины, приведенной к 1 т·км экономии от внедрения данной системы, т. е. с технической точки зрения модернизация тепловозного парка локомотивного депо целесообразна.

Подводя итоги и опираясь на проведенные исследования, можно сделать главный вывод: устоявшееся мнение о том, что электрическая тяга эффективнее тепловозной, не вполне обосновано.

По результатам расчетов получается, что по расходу энергии на единицу выполняемой работы электротяга и теплотяга равноценны. По затратам на энергоносители существенное преимущество имеет электротяга из-за сложившихся цен на дизтопливо и электроэнергию. Но с учетом значительных капиталовложений в электрификацию дорог экономически выгоднее в современных условиях использовать теплотягу вместо дальнейшей электрификации железных дорог. А если для теплотяги использовать природный газ вместо дизтоплива, то применение газотепловозов может быть выгоднее электротяги даже на участках дорог, которые уже электрифицированы.

Экономическая эффективность локомотивной тяги без учета затрат на создание и поддержание инфраструктуры

Проведем сравнение эффективности энергоносителей (в электровозной и тепловозной тяге) по их стоимости в 1 киловатт-часе электроэнергии, реализованной на тягу (на ободе колес).

С этой целью вначале заметим, что, с одной стороны, $1 \text{ Дж} = 2,388459 \cdot 10^{-4} \text{ ккал}$, а с другой — $1 \text{ Дж} = 2,777778 \cdot 10^{-7} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Отсюда $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 860 \text{ ккал}$.

Далее рассуждения построим следующим образом. Из теории теплотехники известно, что если один килограмм энергоносителя выделяет Q_H ккал тепла, то энергию в 1 кВт·ч выделит следующее количество энергоносителя:

$$\frac{1 \text{ кВт}}{Q_H \text{ ккал}} \cdot 1 \text{ кг} = \frac{860 \text{ ккал}}{Q_H \text{ ккал}} \cdot 1 \text{ кг}.$$

Или с учетом КПД системы:

$$\frac{1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}}{Q_H \text{ ккал}} \cdot 1 \text{ кг} = \frac{860 \text{ ккал}}{\eta \cdot Q_H \text{ ккал}} \cdot 1 \text{ кг}.$$

Отсюда стоимость C энергоносителя, образующего энергию в 1 кВт·ч на тягу, определяется в соответствии с выражением

$$C = \frac{860 \cdot C_{\text{ЭН}}}{Q_H \cdot \eta}, \quad (4)$$

где $C_{эн}$ — цена 1 кг (нм^3) энергоносителя;

Q_H — низшая теплотворная способность энергоносителя;

η — КПД преобразования энергоносителя.

Цены на энергоносители приведены в табл. 1.

Стоимость угля, необходимого для выработки 1 кВт·ч электроэнергии в условиях конденсационной электростанции, при $Q_H = 7\,000$ ккал/кг, $\eta_{кэс} = 0,3$ составит

$$C_{эс} = \frac{860 \cdot C_y}{7000 \cdot 0,3}, \quad (5)$$

где C_y — стоимость 1 кг угля.

Таблица 1

Цены на энергоносители

Вид энергоносителя	Цена единицы (кг, нм^3 , кВт·ч), руб.				
	СССР (1990 г.)	Украина (март 2008 г.)	Россия (март 2008 г.)	США (март 2008 г.)	Швейцария (март 2008 г.)
Уголь за 1 кг (C_y)	0,115	4,5	3,3	0,85	4,25
Дизельное топливо за 1 кг ($C_{дт}$)	0,35	27,5	4,71	13,15	46,6
Природный газ за 1 нм^3 (C_g)		5,1	1,005		3,3
Электроэнергия за 1 кВт·ч ($C_{ээ}$)	0,1 (для ж/д) 0,2 (общепром.)	1,9	1,55	1,56	2,2

В соответствии с ценами угля, приведенными в первой строке табл. 1, получим:

$$C_{эс}^{СССР} = 0,01 \text{ руб.}; C_{эс}^{Укр} = 1,84 \text{ руб.}; C_{эс}^{Рос} = 1,35 \text{ руб.};$$

$$C_{эс}^{США} = 0,33 \text{ руб.}; C_{эс}^{Швейц} = 1,74 \text{ руб.}$$

Разделив эту строку на четвертую строку табл. 1 (стоимости 1 кВт·ч электроэнергии), после умножения на 100 получим долю в процентах стоимости энергоносителя в одном киловатт-часе произведенной электроэнергии:

$$d_{эс}^{СССР} = 47\%; d_{эс}^{Укр} = 66\%; d_{эс}^{Рос} = 87\%; d_{эс}^{США} = 22\%; d_{эс}^{Швейц} = 80\%.$$

Эти результаты характеризуют уровни важности проблемы эффективного использования энергоносителей в разных странах и подчеркивают актуальность исследуемой темы для железнодорожной отрасли.

Далее рассмотрим возможные варианты приобретения энергоносителей и формирования тяги.

1. Электровоз получает электропитание посредством энергоструктуры, являющейся собственностью железнодорожного ведомства (железной дорогой закупается уголь для собственной электростанции). В этом случае стоимость энергоносителя (угля) для получения энергии в 1кВт·ч на ободу колеса составит

$$C_{эт1} = \frac{860 \cdot C_y}{Q_H \cdot \eta_{эт}}. \quad (6)$$

Цены на уголь из табл. 1 и значение $\eta_{ЭТ} = 0,17$, полученное в выражении (4), формируют следующие данные:

$$C_{ЭТ1}^{СССР} = 0,09 \text{ руб.}; C_{ЭТ1}^{Укр} = 2,17 \text{ руб.}; C_{ЭТ1}^{Рос} = 2,39 \text{ руб.};$$

$$C_{ЭТ1}^{США} = 0,62 \text{ руб.}; C_{ЭТ1}^{Швейц} = 3,07 \text{ руб.}$$

2. Для электровоза закупается электроэнергия на входе в тяговую подстанцию. При этом инфраструктура до тяговой подстанции не принадлежит железной дороге. Тогда потери железнодорожного ведомства определит следующее значение КПД:

$$\eta_{ЭТ} = \eta_{ТП} \cdot \eta_{КС} \cdot \eta_{ЭВ} \cdot \beta_{ЭВ} = 0,63, \quad (7)$$

а стоимость энергоносителя, используемая для формирования 1 кВт·ч энергии на ободе колеса электровоза, составит

$$C_{ЭТ2}^{СССР} = 0,16 \text{ руб.}; C_{ЭТ2}^{Укр} = 3,02 \text{ руб.}; C_{ЭТ2}^{Рос} = 2,46 \text{ руб.};$$

$$C_{ЭТ2}^{США} = 2,48 \text{ руб.}; C_{ЭТ2}^{Швейц} = 3,49 \text{ руб.}$$

Вывод. Сравнение значений $C_{ЭТ1}$ и $C_{ЭТ2}$ (табл. 2) для железных дорог разных стран свидетельствует о том, что:

– всем железнодорожным ведомствам выгоднее иметь энергопроизводящие и транспортирующие энергосистемы в своем составе. В СССР, с точки зрения МПС, это было выгоднее в 1,88 раз, для Укрзализныци — в 1,4 раза, для ж/д ведомства США — в 4,02, для Швейцарии — в 1,14 раза;

– для ОАО «РЖД» такая выгода хотя и имеет место (в 1,031 раза), но она менее существенна.

Естественен вопрос: если это выгодно, то почему же перечисленные государства не идут по этому пути?

Относительно СССР, с единственно государственной формой собственности на имущество МПС, этот вопрос риторический. В тех условиях, с точки зрения государства, принадлежность энергогенерирующих мощностей к тому или иному ведомству значения не имела, т. к. все равно оставалась государственной.

Таблица 2

**Стоимости различных энергоносителей
в 1 кВт·ч энергии на ободе колеса локомотива**

Показатель	СССР	Украина	Россия	США	Швейцария
Стоимость энергоносителя, необходимого для выработки 1 кВт·ч электроэнергии в условиях конденсационной электростанции, руб.	$C_{ЭС}^{СССР} = 0,05$	$C_{ЭС}^{Укр} = 1,25$	$C_{ЭС}^{Рос} = 1,35$	$C_{ЭС}^{США} = 0,35$	$C_{ЭС}^{Швейц} = 1,75$

Доля стоимости энергоносителя в одном киловатт-часе произведенной электроэнергии, %	$d_{\text{ЭС}}^{\text{СССР}} = 47$	$d_{\text{ЭС}}^{\text{Укр}} = 78$	$d_{\text{ЭС}}^{\text{Рос}} = 87$	$d_{\text{ЭС}}^{\text{США}} = 22$	$d_{\text{ЭС}}^{\text{Швейц}} = 80$
Стоимость энергоносителя для получения энергии в 1 кВт·ч на ободе колеса электровоза при наличии собственной электростанции, руб.	$C_{\text{ЭТ1}}^{\text{СССР}} = 0,09$	$C_{\text{ЭТ1}}^{\text{Укр}} = 2,17$	$C_{\text{ЭТ1}}^{\text{Рос}} = 2,40$	$C_{\text{ЭТ1}}^{\text{США}} = 0,62$	$C_{\text{ЭТ1}}^{\text{Швейц}} = 3,07$
Стоимость энергоносителя для получения энергии в 1кВт·ч на ободе колеса электровоза при закупке электроэнергии, руб.	$C_{\text{ЭТ2}}^{\text{СССР}} = 0,16$	$C_{\text{ЭТ2}}^{\text{Укр}} = 3,02$	$C_{\text{ЭТ2}}^{\text{Рос}} = 2,46$	$C_{\text{ЭТ2}}^{\text{США}} = 2,48$	$C_{\text{ЭТ2}}^{\text{Швейц}} = 3,49$
Стоимость энергоносителя для получения энергии в 1кВт·ч на ободе колеса тепловоза, работающего на дизельном топливе, руб.	$C_{\text{ТТ1}}^{\text{СССР}} = 0,12$	$C_{\text{ТТ1}}^{\text{Укр}} = 8,90$	$C_{\text{ТТ1}}^{\text{Рос}} = 7,63$	$C_{\text{ТТ1}}^{\text{США}} = 4,25$	$C_{\text{ТТ1}}^{\text{Швейц}} = 15,10$
Стоимость энергоносителя для получения энергии в 1кВт·ч на ободе колеса тепловоза, работающего на газе, руб.		$C_{\text{ТТ2}}^{\text{Укр}} = 2,20$	$C_{\text{ТТ2}}^{\text{Рос}} = 0,43$		$C_{\text{ТТ2}}^{\text{Швейц}} = 1,40$

В нынешних России и Украине ситуация аналогична. Однако она может измениться после реформирования ОАО «РЖД» и Укрзалізничці, если система снабжения тягового подвижного состава энергоносителями не останется государственной.

Но почему же тогда США не идет по этому пути? Ответ кроется в значительных сроках окупаемости вложений (о чем подробнее изложено ниже), связанных со строительством или приобретением энергопроизводящих и транспортирующих мощностей.

Эти сроки увеличиваются еще и в связи с относительно невысокой грузонапряженностью железнодорожных магистралей США.

3. Тепловоз работает на дизельном топливе. Для приведенных в табл. 1 значений цен дизельного топлива при низшей теплотворной способности дизельного топлива $Q_H^{DT} = 10\,200$ ккал/кг и обоснованном выше КПД тепловозной тяги $\eta_{TT} = 0,26$ в соответствии с формулой

$$C_{TT1} = \frac{860 \cdot C_{DT}}{Q_H^{DT} \cdot \eta_{TT}} \quad (8)$$

вычислим стоимость дизтоплива на формирование энергии в 1кВт·ч на ободе колеса тепловоза:

$$C_{TT1}^{СССР} = 0,12 \text{ руб.}; C_{TT1}^{Укр} = 8,90 \text{ руб.}; C_{TT1}^{Рос} = 7,63 \text{ руб.};$$

$$C_{TT1}^{США} = 4,25 \text{ руб.}; C_{TT1}^{Швейц} = 15,10 \text{ руб.}$$

Полученные данные занесены в табл. 2.

Вывод (сделан при условиях использования традиционных энергетических установок в отличие от предлагаемых в настоящее время при модернизации ТПС, а также завершения полной окупаемости затрат, связанных с электрификацией железных дорог). В СССР соотношение цен на энергоносители было таково, что выгоднее было использовать тепловозную тягу, чем закупать электроэнергию (в 1,4 раза). Однако производить электроэнергию для собственных нужд все же было несравнимо выгоднее. В других же странах использование электротяги выгоднее по сравнению с тепловозной тягой:

– при закупке электроэнергии: в Украине — в 2,95 раза, в России — в 3,1 раза, в США — 1,72 раза, в Швейцарии — 4,32 раза;

– при производстве собственной электроэнергии: в Украине — в 4,1 раза, в России — в 3,2 раза, в США — 6,91 раза и в Швейцарии — 4,91 раза.

Вновь возникает вопрос: почему же, например, США не переходят на электротягу? Ответ все тот же: переход на электротягу требует очень больших капитальных вложений, которые окупятся нескоро.

4. Тепловоз работает на природном газе. При этом в стоимость газа включены расходы (10%) на его компримирование (сжатие). В соответствии с ценами на природный газ (табл. 1), низшей теплотворной способностью тепловоза $Q_H^G = 8\,500$ ккал/нм³ и КПД тепловозной тяги $\eta_{TT} = 0,26$ будем использовать формулу

$$C_{TT2} = \frac{860 \cdot 1,1 \cdot C_G}{Q_H^G \cdot \eta_{TT}} \quad (9)$$

В этом случае стоимости природного газа на образование энергии в 1кВт·ч

на ободе колеса тепловоза составят:

$$C_{ТТ2}^{Укр} = 2,20 \text{ руб.}; C_{ТТ2}^{Рос} = 0,43 \text{ руб.}; C_{ТТ2}^{Швейц} = 1,40 \text{ руб.}$$

Вывод (сделан при условии завершения полной окупаемости электрификации и перевода на газообразное топливо). Из-за низкой стоимости природного газа в России гораздо выгоднее использовать его для образования тепловозной тяги даже по сравнению с использованием электроэнергии собственного производства. В Украине преимущества использования природного газа для тепловозной тяги находятся на уровне выгод электротяги.

Дальнейшие вычисления, не снижая общности, будем производить для современных условий Украины и России, т. е. для вариантов электровозной тяги с закупкой электроэнергии на входе в тяговую подстанцию, традиционной тепловозной тяги и теплотяги после выполнения модернизации локомотива. При этом будем учитывать как затраты на энергоносители, так и затраты, связанные с приобретением новых тепловозов, модернизацией устаревших, а также с созданием и поддержанием инфраструктуры электроснабжения для случая замены тепловой тяги на электрическую.

В настоящее время в России, как и во всех других странах бывшего соцлагеря, в связи с крайней изношенностью инвентарного тепловозного парка железнодорожники стоят перед выбором одной из следующих альтернатив [6]:

- электрифицировать участки железных дорог, традиционно обслуживаемые тепловозами, и приобрести электровозы;
- закупить новые тепловозы;
- модернизировать тепловозный парк по одному из специальных проектов, для реализации которых требуются средства в размере 50–70% от стоимости новых тепловозов. Модернизированная техника при этом ни в чем не уступает, а зачастую и превосходит многие образцы новых локомотивов. В настоящее время руководство Укрзализныци рассматривает следующие альтернативные модернизационные проекты как наиболее перспективные:
 - с установкой дизель-генераторов производства ОАО «Коломенский завод» (Россия);
 - с установкой двигателя производства фирмы Caterpillar (США) по программе компании CZ LOKO (Чехия) и Zeppelin Power Systems;
 - силового модуля по программе компании General Electric (США);
 - проект General Motors (США).

Итак, с учетом опыта эксплуатации энергетических установок производства компаний Caterpillar, General Electric, General Motors, ОАО «Коломенский завод» и оперируя средними значениями их характеристик (увеличение в результате модернизации мощности тепловоза на 15% и уменьшение потребления топлива на 20%), стоимости энергоносителя, необходимого для создания 1 кВт·ч энергии на ободе колеса локомотива, представлены в табл. 3. Участие в дальнейшем анализе тепловозной тяги СССР смысла не имеет, т. к. тепловозов с такими характеристиками в СССР не было. Вместе с тем, определенный интерес представляют железные дороги Швейцарии, которые провели электрификацию 100% своих магистралей.

**Стоимости энергоносителей
в 1 кВт·ч энергии с учетом преимуществ модернизации**

Показатель	Швейцария	Украина	Россия	США
Стоимость энергоносителя для получения энергии в 1кВт·ч на ободе колеса электровоза при закупке электроэнергии на входе в тяговую подстанцию, руб.	$C_{ЭТ}^{Швейц} = 3,49$	$C_{ЭТ}^{Укр} = 3,02$	$C_{ЭТ}^{Рос} = 2,46$	$C_{ЭТ}^{США} = 2,47$
Стоимость энергоносителя для получения энергии в 1 кВт·ч на ободе колеса тепловоза, работающего на дизельном топливе, руб.	$C_{ТТмод}^{Швейц} = 5,28$	$C_{ТТмод}^{Укр} = 3,12$	$C_{ТТмод}^{Рос} = 2,67$	$C_{ТТмод}^{США} = 1,49$

Вывод (сделан даже без учета затрат на электрификацию железных дорог). По причине относительно низкой стоимости дизельного топлива в США целесообразно отдать предпочтение современной тепловозной тяге. В Украине, России и Швейцарии ситуация противоположная.

**Математико-экономическое обоснование решений
по модернизации ТПС и электрификации железных дорог
на примере опыта Украины и других стран**

Существует два подхода к решению проблемы модернизации ТПС. Первый подход состоит в выполнении точных расчетов для конкретного локомотива и состава, а второй выполняется в целях сравнения различных видов тяги и не требует учета условий эксплуатации отдельного локомотива.

Использование первого подхода предполагается на этапе выбора оптимального варианта модернизации каждого тепловоза, работающего в конкретных условиях эксплуатации.

Известно, что энергия, затрачиваемая на движение поезда, расходуется на преодоление сил основного и дополнительного сопротивлений движению. Работа по преодолению этих сил вычисляется как произведение силы на путь. Силы основного и дополнительного сопротивлений движению поезда на элементе профиля пути равны $mg(w_0 + i_i)$, а работа (в джоулях) на перегоне или участке пути, равна сумме работ, совершаемых на каждом таком элементе:

$$A_w = 1\,000mg \sum (w_0 + i_i) S_i, \quad (10)$$

где i_i — приведенный уклон каждого элемента профиля пути, %;

S_i — длина каждого элемента, км;

1 000 — переводной коэффициент перевода километров в метры;

w_0 — основное удельное сопротивление движению поезда на прямом

и горизонтальном пути;

m — масса поезда, кг;

g — ускорение свободного падения, м/с².

С изменением скорости силы основного сопротивления движению изменяются в сравнительно небольших пределах. Для ориентировочных расчетов их можно взять при средней скорости движения (для наших грузовых поездов — 50–60 км/ч). Элементы профиля пути (подъемы и спуски) можно заменить одним эквивалентным уклоном, при движении по которому будет затрачено столько же энергии, сколько и по реальному профилю.

Эквивалентный уклон:

$$i_{\text{э}} = \frac{1000(H_K - H_H) + \sum (i_{BP} - w_{OCP})S_{BP} + \sum w_{KP}S_{KP}}{S}, \quad (11)$$

где $H_K - H_H$ — разница высот начального и конечного пунктов над уровнем моря, м;

i_{BP} — удельное дополнительное сопротивление вредных спусков, на которых $i > w_{OX \max}$ при наибольшей допустимой скорости движения. При движении по такому спуску на выбеге скорость возрастает и приходится включать тормоза;

S_{BP} — длина вредного спуска, м;

w_{KP} — удельное дополнительное сопротивление движению от кривой, Н/кН или ‰;

S_{KP} — длина кривой, м;

S — длина участка, м.

При переходе к $i_{\text{э}}$ выражение (10) примет вид:

$$A_w = 1000mg (w_{OCP} + i_{\text{э}})S. \quad (12)$$

Определение объема работы (в т·км) на тягу поезда, которую выполнит энергоноситель, создающий на ободу колеса энергию в 1 кВт·ч, выполняется с использованием следующего выражения ($1 \text{ Дж} = 1,388889 \cdot 10^{-8} \text{ кВт·ч}$):

$$A_w [\text{Дж}] = 1000m [\text{кг}] g \left[\frac{\text{М}}{\text{с}^2} \right] (w_{OCP} + i_{\text{э}}) S [\text{км}]. \quad (13)$$

Составляющие сил сопротивления движению зависят от большого числа факторов, учет которых значительно усложняет расчеты. Поэтому на практике основное удельное сопротивление движению каждого вида подвижного состава определяют по эмпирическим формулам, полученным ВНИИЖТ на основании обработки результатов испытаний. Так, при движении под током (в режиме тяги) по стыковому (звеньевому) пути основное удельное сопротивление поезда w_{OCP} (Н/кН) вычисляют по формуле:

$$w_{OCP} = \frac{w_{OCP}^I m_l + w_{OCP}^{II} m_c}{m_l + m_c}, \quad (14)$$

где m_l и m_c — массы локомотива и состава;

w_{OCP}^I и w_{OCP}^{II} — средние удельные сопротивления локомотива и состава соответственно.

При средней скорости движения 50 км/ч основное удельное сопротивление движению локомотива w_{0cp}^1 составляет:

$$w_{0cp}^1 = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2 \quad (15)$$

Далее, например, для груженых четырехосных вагонов на роликовых подшипниках и вагонов рефрижераторных поездов с $m_{BO} = 17,5$ т при средней скорости движения 50 км/ч:

$$w_{0cp}^{11} = 0,7 + (3 + 0,01v + 0,0025v^2) / m_{BO} \quad (16)$$

Таким образом, возникает принципиальная возможность учета сопротивления поезда любой комплектации.

При выполнении второго подхода заметим, что если для создания 1 кВт·ч энергии на ободу колеса требуется израсходовать энергоноситель на сумму $C_{тяги\ кВт\cdotч}^{ГОС}$, то для создания энергии 1 Н·м — уже $1,388889 \cdot 10^{-8} \cdot C_{тяги\ кВт\cdotч}^{ГОС}$ руб. Энергия же, соответствующая 1 т·км работы, потребует

$$C_{тяги\ т\cdotкм}^{ГОС} = \frac{2,777778 \cdot 10^{-4} C_{тяги\ кВт\cdotч}^{ГОС}}{1,02 \cdot 10^{-4}} \quad (17)$$

Результаты вычислений с использованием последней формулы сведены в табл. 4.

Таким образом, без учета затрат на строительство и поддержание инфраструктуры системы электроснабжения участка железной дороги определим выигрыш (экономия) от использования электротяги по сравнению с тепловозной тягой на каждом т·км работы:

- в Швейцарии: $\Delta C^{Швейц} = C_{ТТ\text{мод}\cdot\text{км}}^{Швейц} - C_{ЭТ\cdot\text{км}}^{Швейц} = 4,90$ руб.;
- в России: $\Delta C^{Рос} = C_{ТТ\text{мод}\cdot\text{км}}^{Рос} - C_{ЭТ\cdot\text{км}}^{Рос} = 0,55$ руб.;
- в Украине: $\Delta C^{Укр} = C_{ТТ\text{мод}\cdot\text{км}}^{Укр} - C_{ЭТ\cdot\text{км}}^{Укр} = 0,30$ руб.;
- в США: $\Delta C^{США} = C_{ТТ\text{мод}\cdot\text{км}}^{США} - C_{ЭТ\cdot\text{км}}^{США} = -0,27$ руб.

Таблица 4

Стоимости энергоносителей для выполнения работ в 1 т·км различными видами тяги

Показатель	Швейцария	Россия	Украина	США
Стоимость энергоносителя, соответствующего выполнению электровозом работы в 1 т·км, руб.	$C_{ЭТ\cdot\text{км}}^{Швейц} = 9,50$	$C_{ЭТ\cdot\text{км}}^{Рос} = 6,70$	$C_{ЭТ\cdot\text{км}}^{Укр} = 8,20$	$C_{ЭТ\cdot\text{км}}^{США} = 6,74$
Стоимость энергоносителя, соответствующего выполнению тепловозом работы в 1 т·км, руб.	$C_{ТТ\text{мод}\cdot\text{км}}^{Швейц} = 14,40$	$C_{ТТ\text{мод}\cdot\text{км}}^{Рос} = 7,25$	$C_{ТТ\text{мод}\cdot\text{км}}^{Укр} = 8,50$	$C_{ТТ\text{мод}\cdot\text{км}}^{США} = 6,47$

Покажем зависимость преимуществ электрической тяги (без учета затрат на создание и поддержание инфраструктуры энергосистемы) от степени загруженности (грузопотока) $R_{уч}$ в т·км/год участка железнодорожного пути (рис. 2). Эти преимущества отражают величину сэкономленных средств на энергоносители при использовании электротяги, по сравнению с модернизированной тепловой тягой, без учета капитальных вложений в электрификацию и выполнение проекта модернизации.

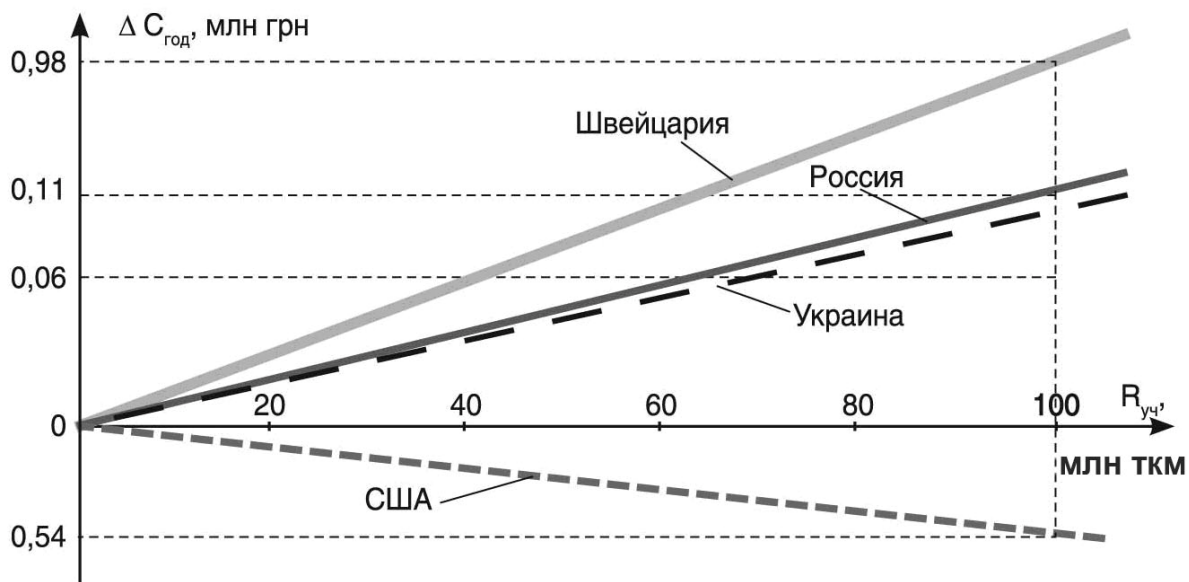


Рис. 2. Графики экономии средств на энергоносители при использовании электротяги без учета затрат, связанных с электрификацией и выполнением проекта модернизации

Не учитывая затраты, связанные с электрификацией и выполнением проекта модернизации, можно сделать вывод, что в анализируемых странах Европы использование электротяги дает экономию средств, затрачиваемых на энергоноситель. Наибольшая выгода при этом соответствует условиям Швейцарии. Не случайно в этой стране осуществлена 100-процентная электрификация железных дорог. Полученные результаты также подтверждают, что в США ситуация диаметрально противоположна. Ведь математико-экономические расчеты показывают, что модернизация изношенного локомотивного парка обладает преимуществами перед внедрением электрификации при условии, когда приведенные к 1 т·км затраты на содержание системы электроснабжения не менее величины, приведенной к 1 т·км экономии от внедрения данной системы. Другими словами, учитывая экономические аспекты данного мероприятия, можно заключить, что процесс модернизации выгоден как с экономической, так и с технической точки зрения, к тому же по временным характеристикам процесс модернизации осуществляется значительно быстрее, чем электрификация всех подъездных путей и плеч, на которых используется тепловозный парк локомотивного депо.

Сравнение экономических показателей видов тяги с учетом затрат на модернизацию тепловозной тяги и электрификацию железных дорог

Детальный расчет стоимости электрификации железных дорог многократно выполнялся в ОАО «РЖД». В интересах выполняемых в данной работе расчетов воспользуемся некоторыми из его результатов. В частности, потребуются данные о средних затратах на создание ($Z_{созд}^{1км}$) и содержание ($Z_{сод}^{1км}$) в течение года инфраструктуры системы энергоснабжения, приведенные к 1 км пути. Такие данные были получены автором в Департаменте электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД»:

$$Z_{созд}^{1км} = \frac{6,5 \text{ млн руб.}}{1 \text{ км}}; \quad Z_{сод}^{1км} = \frac{0,18 \text{ млн руб.}}{1 \text{ км}}.$$

Заметим, что поскольку целью данной работы является сравнение видов тяги, а не оценка полных расходов, связанных с эксплуатацией, то здесь в качестве расходов вполне достаточно использовать только те их составляющие, которые различны для разных видов тяги. Наличие данной методики позволяет, при необходимости, выполнить и более точные, хотя значительно более громоздкие с точки зрения вычислений, оценки. Выполним вычисления для неэлектрифицированной части железных дорог России. Совершенно очевидно, что аналогичные расчеты могут быть выполнены для любого участка любой из железных дорог.

Приведенные к 1 км расходы по электрификации и содержанию системы электроснабжения железнодорожного пути за k лет, будут равны:

$$Z_{э}^{1кмк} = Z_{созд}^{1км} + k \cdot Z_{сод}^{1км}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (18)$$

Например, за один год приведенные к 1 км расходы на электрификацию и содержание системы электроснабжения составят 30,39 млн руб., за два — 30,57 млн руб., за десять лет — 32,005 млн руб. (рис. 3).

Оценим теперь приведенные к 1 т·км грузооборота расходы, связанные с электрификацией и содержанием системы электроснабжения железных дорог Украины и России (рис. 3). По данным [7], протяженность Московской, Восточно-Сибирской, Северной и Юго-Восточной железнодорожных дорог России составляет $L = 22,5$ тыс. км, из них электрифицировано 43%, т. е. около 10 000 км.

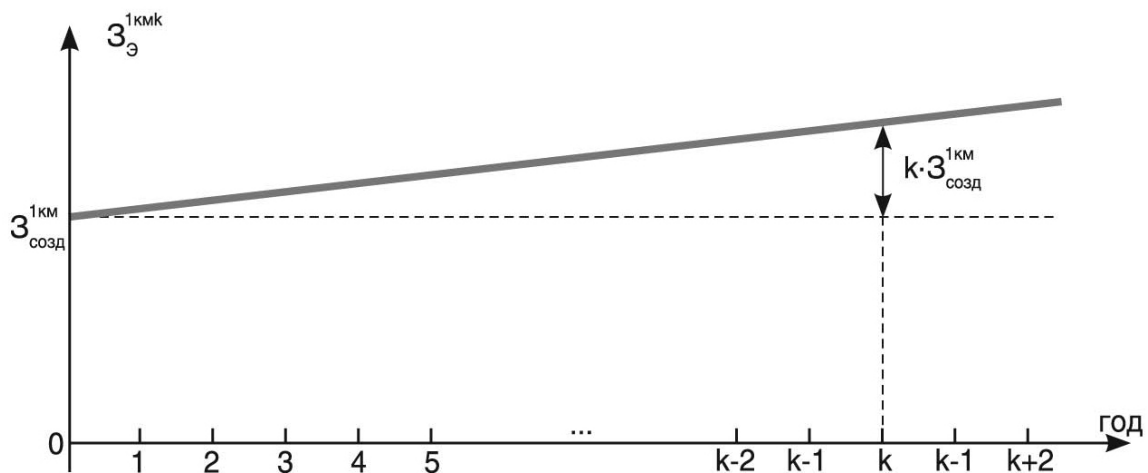


Рис. 3. Приведенные к 1 км железнодорожного пути расходы на создание и содержание системы электроснабжения

Кроме того, в электротяге выполняется 82,7% эксплуатационных работ. В качестве величины годового грузооборота этих участков РЖД по оценкам Госстандарта РФ примем $R = 254,2$ млрд т·км.

Отсюда в качестве оценки грузооборота, выполняемого сегодня тепловозной тягой на неэлектрифицированной части железных дорог, естественно принять величину $R_{НЭ} = 254,2 \times [1 - 0,827] = 43,98$ млрд т·км/год.

Чтобы построить систему электроснабжения неэлектрифицированной части и затем выполнить электротягой работу A_w [т·км], потребуются затраты:

- единовременно: $3_{созд}^{1км} \times 22473 \times (1 - 0,43)$ руб. — на построение системы электроснабжения;
- ежегодно: $3_{сод}^{1км} \times 22473 \times (1 - 0,43)$ руб. в течение $A_w/R_{НЭ}$ лет — на содержание системы электроснабжения.

Ежегодные расходы на содержание системы электроснабжения в пересчете на 1 т·км составят

$$3_{сод}^{1т·км} = \frac{3_{сод}^{1км} \times 22473 \times (1 - 0,43)}{R_{НЭ}}. \quad (19)$$

Выше приведенные результаты свидетельствуют, что электротяга, в принципе, окупается. Для этого приведенная к 1 т·км грузооборота величина экономии средств (на энергоносители и др.), полученная в результате отказа от тепловой и перехода на электрическую тягу, не меньше приведенных к 1 т·км расходов на создание и содержание системы электроснабжения железной дороги:

$$\Delta C \geq 3. \quad (20)$$

Получив этот вывод, определим горизонт окупаемости проекта электрификации железной дороги. Этой цели способствуют графические построения, представленные на рис. 4.

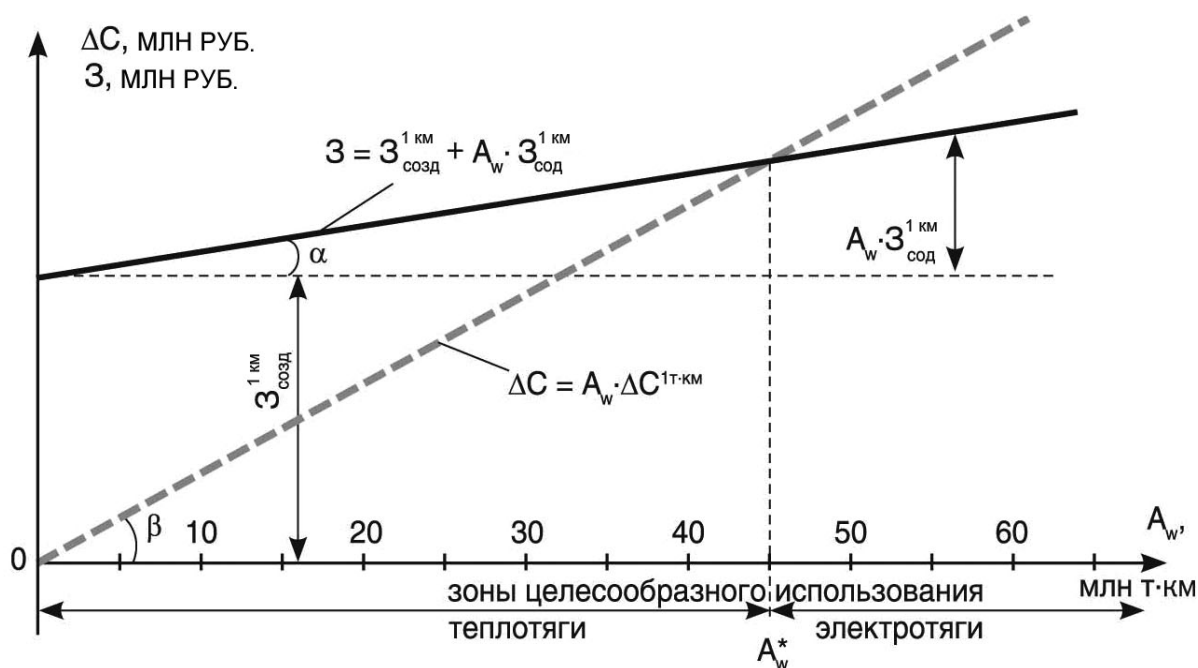


Рис. 4. Построение зон целесообразного использования различных видов тяги

При замене на некотором железнодорожном участке тепловой тяги электрической система электроснабжения создается на всей протяженности участка. Поэтому с этой точки зрения затраты на создание системы электроснабжения практически не зависят от длины участка или выполняемой работы: $Z_{созд}^{1км} = Z_{сод}^{1м-км} = Z_{созд}$.

Уравнение прямой, описывающей размер сэкономленных от внедрения электротяги средств, имеет вид

$$\Delta C = A_W \cdot \Delta C^{1м-км}. \quad (21)$$

Уравнение прямой, описывающей дополнительные затраты, связанные с внедрением системы электроснабжения, имеет вид

$$Z = Z_{созд} + A_W \cdot Z_{сод}^{1м-км}. \quad (22)$$

Горизонт окупаемости перехода на электротягу определяется точкой A^* (рис. 4) и соответствует такому значению $A_W = A^*$, при котором наступает равенство:

$$\Delta C_{уч} = Z_{ЭТ} \text{ или } A_W \cdot \Delta C^{1м-км} = Z_{созд} + A_W \cdot Z_{сод}^{1м-км}. \quad (23)$$

Следовательно, окупаемость проекта электрификации железнодорожного участка наступает в момент выполнения условия

$$A_W \geq \frac{Z_{созд}}{\Delta C^{1м-км} - Z_{сод}^{1м-км}}. \quad (24)$$

Другими словами, окупаемость наступает после выполнения объема эксплуатационных работ, равного отношению капитальных вложений на создание системы электроснабжения железнодорожного участка к разнице приведенных к 1 т·км средств, сэкономленных за счет внедрения электротяги и затраченных на поддержание данной системы.

Заметим, что условие (20) будет выполняться, если

$$tg \alpha \leq tg \beta. \quad (25)$$

Электротяга окупаема, если тангенс угла наклона прямой экономии средств от ее внедрения на некотором участке больше тангенса угла наклона прямой затрат на содержание системы электрификации данного участка. В противном случае электрификация участка нецелесообразна.

Данное условие может быть записано в виде

$$\Delta C^{1м-км} > Z_{сод}^{1м-км}. \quad (26)$$

В противном случае следует производить модернизацию изношенного локомотивного парка.

Модернизация изношенного локомотивного парка обладает преимуществами перед внедрением электрификации при условии, когда приведенные к 1 т·км затраты на содержание системы электроснабжения не меньше величины приведенной к 1 т·км экономии от внедрения данной системы, т. е.

$$Z_{сод}^{1м-км} \geq \Delta C^{1м-км}. \quad (27)$$

Заметим, что сроки окупаемости любого проекта модернизации определяются аналогично тому, как это было сделано для проекта электрификации железнодорожного участка. Поэтому окупаемость проекта модернизации тепловозного парка наступает после выполнения модернизированной техникой объема работ:

$$A_w \geq \frac{Z_{\text{модерн}}}{\Delta C^{1\text{т-км}} - \Delta Z_{\text{сод}}^{1\text{т-км}}}, \quad (28)$$

где A_w — объем эксплуатационных работ, выполняемый модернизированной техникой;

$Z_{\text{модерн}}$ — стоимость работ по выполнению модернизационных мероприятий;

$\Delta C^{1\text{т-км}}$ — приведенная к 1 т·км экономия, связанная с эксплуатацией модернизированной техники по сравнению с немодернизированной техникой;

$\Delta Z_{\text{сод}}^{1\text{т-км}}$ — приведенные к 1 т·км дополнительные затраты на содержание модернизированной техники по сравнению с затратами на содержание немодернизированной техники.

На основании расчетов рассмотрим алгоритм действий (рис. 4), связанных с обновлением ТПС, который состоит в следующем.

В зависимости от остаточного ресурса R локомотива формируются четыре группы ТПС:

1) группа ТПС с остаточным ресурсом $R_H \geq R > R_H - R_1$, где R_H — назначенный ресурс, R_1 — ресурс, до выработки которого новым локомотивом модернизация пока экономически не оправдана;

2) группа ТПС с остаточным ресурсом $R_H - R_1 \geq R > R_2$, где R_2 — остаточный ресурс, до расходования которого модернизация локомотива имеет экономические выгоды;

3) группа ТПС с остаточным ресурсом $R_2 \geq R > 0$. Такой малый остаточный ресурс в силу значительного износа основных элементов локомотива (прежде всего, тележки) делает модернизацию уже экономически нецелесообразной;

4) группа ТПС с практически исчерпанным ресурсом $R = 0$. Для данной группы ТПС принимается решение о закупке новых локомотивов (на тепловой или электрической тяге).

ТПС первой группы, имея небольшой износ, продолжает эксплуатироваться без модернизации. Вторая группа ТПС подлежит модернизации в соответствии с одним из модернизационных проектов. Третья группа включает ТПС, который тоже остается в эксплуатации до полного исчерпания ресурса в составе ОАО РЖД или передается на условиях лизинга (или на других условиях) негосударственным железнодорожным операторам. Для ТПС четвертой группы проводится анализ условий эксплуатации локомотива и характеристик железнодорожного участка. При выполнении условия (26) целесообразно закупать электровоз, а при выполнении условия (27) — тепловоз [9, 10].

Проблема выбора варианта модернизации ТПС возникает перед каждой эксплуатирующей организацией (депо), стремящейся к обновлению ТПС, в условиях ограниченных финансовых средств. Рассмотрим возможный подход к разрешению данной проблемы.

Пусть для выполнения предстоящих в очередном году эксплуатационных, маневровых и хозяйственных работ необходимо, чтобы ТПС в составе N_0 тепловозов определенной серии проработал безотказно. Однако техническое состояние локомотива не идеально. Поэтому условимся, что уровень безотказности одного такого тепловоза равен P_{II} , а стоимость его изготовления и эксплуатации составляет C_{II} .

Тогда число тепловозов, необходимых для выполнения всего комплекса работ очередного года, составляет

$$N_H = \frac{N_0}{P_H}. \quad (29)$$

Заметим, что C_H — такое необходимое число тепловозов в составе инвентарного парка локомотивного депо, которое обеспечит выполнение работ немодернизированными тепловозами, имеющими вероятность безотказной работы P_H .

Отсюда $N_0 = N_H \cdot P_H$.

Модернизация тепловоза приводит к увеличению как P_H , так и C_H .

В результате модернизации уровень безотказности одного тепловоза станет равным

$$P_M = P_H + \Delta P. \quad (30)$$

Теперь инвентарный парк ТПС, необходимый для выполнения требуемого объема работ, должен будет включать N_M локомотивов:

$$N_M = \frac{N_0}{P_H + \Delta P}. \quad (31)$$

Очевидно, что $N_M < N_H$, т. е. модернизация приводит к возможности сокращения инвентарного парка тепловозов в силу увеличения вероятности безотказной работы каждого локомотива. Инвентарный парк при этом может быть сокращен на величину ΔN :

$$\Delta N = N_H - N_M = 0. \quad (32)$$

Таким образом, с технической точки зрения модернизация тепловозного парка локомотивного депо целесообразна. Однако в силу закона единства и борьбы противоположностей это техническое условие не является достаточным для принятия решения о проведении модернизационных работ, т. к. затраты на их проведение могут оказаться неприемлемыми.

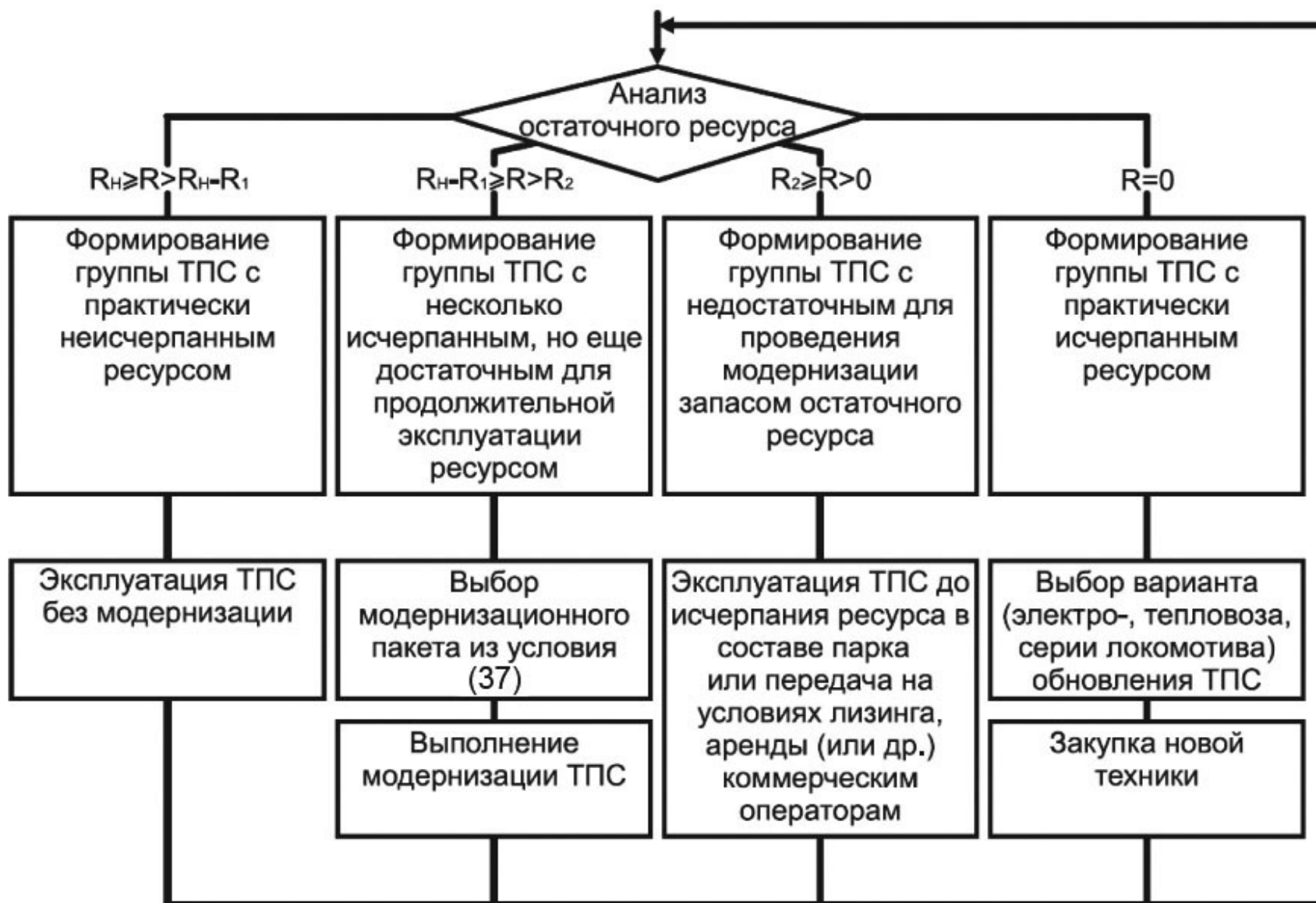


Рис. 5. Алгоритм управления состоянием тепловозного парка

Следовательно, необходим учет экономической составляющей процесса модернизации.

Стоимость выполнения запланированных на очередной год работ немодернизированной техникой составит $C_{II}N_0/P_{II}$. После выполнения модернизационных мероприятий — $(C_{II} + \Delta C)N_0/P_{II} + \Delta P$. Поэтому условием целесообразности проведения модернизации локомотивного парка депо может быть условие

$$C_{II} \frac{N_0}{P_{II}} = (C_{II} + \Delta C) \frac{N_0}{P_{II} + \Delta P} \quad (33)$$

или

$$\frac{\Delta P}{P_{II}} = \frac{\Delta C}{C_{II}}. \quad (34)$$

Отсюда следует, что модернизация целесообразна, если относительное приращение надежности парка ТПС депо превышает относительное приращение стоимости работ по выполнению модернизации и эксплуатации модернизированной техники. Затрачиваемые при этом средства должны удовлетворять следующему условию:

$$\Delta C = C_{II} \frac{\Delta P}{P_{II}}. \quad (35)$$

Если модернизационных пакетов несколько ($M, m = 1, \dots, M$) и требуется выбрать оптимальный вариант модернизации, то естественно провести ранжирование предлагаемых пакетов в порядке убывания положительных величин:

$$\Delta v_m = \frac{\Delta P_m}{P_{II}} - \frac{\Delta C_m}{C_{II}}, \quad m = 1, \dots, M. \quad (36)$$

Отрицательное значение Δv_m свидетельствует о принципиальной нецелесообразности выполнения работ в соответствии с анализируемым m -м модернизационным пакетом.

Тогда предпочтение следует отдать модернизационному пакету с наибольшей величиной Δv_m :

$$\text{opt} \Delta v_m = \max_m \left[\frac{\Delta P_m}{P_{II}} - \frac{\Delta C_m}{C_{II}} \right]. \quad (37)$$

Следует заметить, что предложенный подход носит довольно общий характер и может быть использован в процессе принятия решений о необходимости проведения доработок или закупках новой техники в условиях нескольких вариантов действий.

Электротяга окупается, если приведенные к 1 т·км грузооборота расходы на создание и содержание системы электроснабжения железной дороги не меньше приведенной к 1 т·км величины экономии средств (на энергоносители и др.), полученной в результате отказа от тепловой и перехода на электрическую тягу. Тогда как второе направление — полное обновление локомотивного парка — задача сегодня не реальная, быстро ее не решить. Кроме того, новые локомотивы дают ощутимый экономический

эффект лишь при вводе в эксплуатацию не единичных экземпляров, а хотя бы небольших партий.

Как показывает мировой опыт, оптимальным решением является модернизация локомотивов. В Украине эта практика также получает широкое распространение.

Литература

1. Осипов С. И., Осипов С. С. Основы тяги поездов. — 2000. — 592 с.
2. Зеленченко А. П. Устройства диагностики тяговых двигателей электрического подвижного состава. — 2002. — 38 с.
3. Кузьмич В. Г. Теория локомотивной тяги. — 2005. — 448 с.
4. Бубнева Н. Г. Тепловозы (на английском языке). — 2007. — 40 с.
5. Ветров Ю. Н., Приставка М. В. Конструкция тягового подвижного состава. — 2000. — 316 с.
6. Майба И. А. Повышение эксплуатационной эффективности фрикционных систем железнодорожного подвижного состава. 2005. — 216 с.
7. Киселев И. П., Сотников Е. А., Суходоев В. С. Высокоскоростные железные дороги. — СПб.: Изд-во Петербург. гос. ун-та путей сообщения, 2001. — 60 с.
8. Карминский В. Д. Экологические проблемы и энергосбережение. 2004. — 592 с.
9. Петропавлов Ю. П. Технология ремонта электроподвижного состава. 2006. — 432 с.
10. Грищенко А. В. (отв. ред.) и др. Повышение надежности и экономичности локомотивов; сб. науч. тр. / СПб.: ПГУПС, 2008. - 96 с.