

УДК 629.424.1:629.4.016.15

С. Я. ФРЕНКЕЛЬ, кандидат технических наук, А. П. ДЕДИНКИН, ассистент, Р. К. ГИЗАТУЛЛИН, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МНОГОФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ РАСХОДА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В ПАССАЖИРСКОМ ДВИЖЕНИИ

С целью совершенствования существующей системы нормирования расхода дизельного топлива и электрической энергии в пассажирском движении предложена многофакторная регрессионная модель, включающая восемь эксплуатационных факторов. При ее построении использованы статистические данные из маршрутных листов машиниста и метеосводок. Определены накопительный и прогнозный периоды времени, обеспечивающие возможность применения предлагаемой модели для нормирования расхода энергоресурсов за поездку.

Одной из важнейших задач народного хозяйства Республики Беларусь является обеспечение рационального использования топливно-энергетических ресурсов. Железнодорожный транспорт является крупнейшим в республике потребителем дизельного топлива и электрической энергии, расходуемых главным образом на тягу поездов. Ежегодно примерно пятая часть от используемых на тягу энергоресурсов приходится на пассажирское движение. Поэтому большое значение имеет рациональное использование топливно-энергетических ресурсов в пассажирском движении.

Одним из путей снижения расхода энергоресурсов на тягу поездов является совершенствование системы нормирования, что обеспечивает возможность объективной оценки работы локомотивной бригады и теплотехнического состояния локомотива, а следовательно, позволяет принимать эффективные решения по экономии энергоресурсов. При этом оценивается выполнение норм расхода дизельного топлива и электрической энергии на поездку. От обоснованности задаваемых на поездку норм во многом зависит эффективность решений по экономии энергоресурсов и, как следствие, рациональность использования дизельного топлива и электрической энергии в тяге поездов.

Существующая система нормирования нуждается в совершенствовании, прежде всего, по причине ее высокой субъективности. В настоящее время распространение вычислительной техники и автоматизация процесса нормирования дает возможность применения для расчета норм методов, использовавшихся ранее не в полной мере. С приемлемой точностью прогнозировать расход дизельного топлива и электрической энергии за поездку позволяют методы математической статистики [1].

Для расчета норм расхода энергетических ресурсов на поездку в пассажирском движении авторами по данным из маршрутных листов машиниста формы ТУ-3 и метеосводок построена много-

факторная регрессионная модель. Для построения использована статистическая информация из 17218 маршрутных листов тепловозов ТЭП60 локомотивного депо Гомель Белорусской железной дороги за 2006–2008 годы, а также метеорологических сводок за указанный период.

На начальном этапе построения модели определен следующий предварительный перечень количественных эксплуатационных факторов, влияющих на расход энергоресурсов за поездку в пассажирском движении: приведенный уклон участка следования поезда $i_{пр}$, ‰; перевозочная работа A , ткм брутто; масса состава брутто Q , т; пробег L , км; техническая v_T и участковая $v_{уч}$ скорости движения поезда, км/ч; количество остановок поезда на промежуточных станциях $n_{ост}$; нагон $t_{наг}$, мин; температура наружного воздуха $T_{возд}$, °С; скорость попутного $v_{поп}$ и бокового $v_{бок}$ ветра, м/с [2].

Для построения многофакторной регрессионной модели расхода энергоресурсов за поездку выделена основная выборка данных за 2006 год. Для исследования результатов прогнозирования с помощью созданной регрессионной модели определена вспомогательная выборка данных за 2007–2008 годы.

При построении многофакторной регрессионной модели рекомендуется обращать внимание на взаимное влияние факторов, входящих в нее. Наличие в ней взаимосвязанных составляющих ведет к дублированию их влияния на функцию отклика и, в конечном итоге, к искажению результатов моделирования. Во избежание этого необходимо определить факторы, имеющие высокую степень взаимной корреляции между собой, и возможно исключить некоторые из них. Высокой принято считать корреляцию, характеризующуюся коэффициентом $r \geq 0,75$ [3]. Для проверки данного показателя построена матрица парных коэффициентов корреляции (корреляционная матрица), приведенная в таблице 1.

Таблица 1 – Значения парных коэффициентов корреляции

	y	$i_{пр}$	A	Q	L	v_T	$v_{уч}$	$n_{ост}$	$t_{наг}$	$T_{возд}$	$v_{поп}$	$v_{бок}$
y	1,0000	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
$i_{пр}$	0,1815	1,0000	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
A	0,9285	0,1886	1,0000	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Q	0,6718	0,2061	0,8429	1,0000	–	–	–	–	–	–	–	–
L	0,8140	0,1588	0,7402	0,3355	1,0000	–	–	–	–	–	–	–
v_T	0,3141	0,1957	0,3863	0,4243	0,3441	1,0000	–	–	–	–	–	–
$v_{уч}$	0,2510	0,2405	0,3509	0,4297	0,3180	0,8456	1,0000	–	–	–	–	–
$n_{ост}$	0,1071	–0,1711	–0,0212	–0,1904	0,0410	–0,2578	–0,5967	1,0000	–	–	–	–
$t_{наг}$	0,2738	–0,1747	0,1838	0,0600	0,1361	0,0104	–0,3200	0,7053	1,0000	–	–	–
$T_{возд}$	–0,0753	–0,0784	0,0051	0,1159	–0,1939	–0,1105	–0,1455	0,0739	0,1061	1,0000	–	–
$v_{поп}$	–0,0007	0,0131	0,0056	0,0024	0,0160	0,0120	0,0187	–0,0212	–0,0171	–0,0194	1,0000	–
$v_{бок}$	0,0762	0,0255	0,0382	–0,0026	0,0635	–0,0217	–0,0343	0,0388	0,0247	–0,1433	–0,0287	1,0000

Как видно из таблицы 1, в рассматриваемом перечне эксплуатационных факторов наибольшую степень корреляции с функцией отклика y (расходом дизельного топлива за поездку) имеют следующие факторы: A (перевозочная работа, т·км брутто), L (пробег, км), Q (масса состава брутто, т), наименьшая – $v_{поп}$ [скорость встречного (попутного) ветра, м/с]. Между собой в наибольшей степени коррелированы факторы: v_T и $v_{уч}$ ($r(v_T; v_{уч}) = 0,8456$), A и Q ($r(A; Q) = 0,8429$), A и L ($r(A; L) = 0,7402$), $n_{ост}$ и $t_{наг}$ ($r(n_{ост}; t_{наг}) = 0,7053$).

В соответствии с приведенным выше критерием, из числа влияющих факторов при построении многофакторной модели необходимо исключить $v_{уч}$ и Q , так как они обладают меньшим коэффициентом корреляции с функцией отклика y , чем факторы v_T и A соответственно. В дальнейших исследованиях использованы следующие эксплуатационные факторы: A ($r=0,9285$), L ($r=0,8140$), v_T ($r=0,3141$), $t_{наг}$ ($r=0,2738$), $i_{пр}$ ($r=0,1815$), $n_{ост}$ ($r=0,1071$), $v_{бок}$ ($r=0,0762$), $T_{возд}$ ($r=-0,0753$), $v_{поп}$ ($r=-0,0007$).

В большинстве случаев для данных факторов величина коэффициента корреляции с функцией отклика, то есть расходом энергоресурсов за поездку, оказалась меньше $r = 0,75$. Однако при формировании многофакторной регрессионной модели взаимодействие влияющих переменных друг с другом может дать улучшение свойств модели по другим показателям [3]. Поэтому на данном этапе оставлена, например, скорость встречного (попутного) ветра $v_{поп}$, м/с, имеющая весьма низкий коэффициент корреляции с функцией отклика.

Далее для оценки рассматриваемых эксплуатационных факторов по значимости их влияния на расход энергоресурсов за поездку построены однофакторные модели. Значимость данных моделей оценивалась на основании полученных зависимостей, величины их множественного коэффициента

детерминации R^2 , а также величины остаточной дисперсии $S_{ост}^2$ [3].

Установлено, что из числа рассмотренных эксплуатационных факторов наиболее сильное влияние на расход энергоресурсов за поездку оказывает перевозочная работа A , т·км брутто, воздействие которой наилучшим образом (по минимуму остаточной дисперсии $S_{ост}^2$) описывается квадратным уравнением $y = (12,3 + 0,063A)^2$. Величина R^2 при этом достигает 0,864, что является высоким показателем для однофакторной регрессионной модели. Достаточно сильное влияние на расход энергоресурсов за поездку оказывает также величина пробега L , км, с показателем $R^2 = 0,731$.

Степень взаимной корреляции между скоростью встречного (попутного) ветра $v_{поп}$, м/с, и расходом энергоресурсов за поездку является недостаточной ($R^2 = -0,0007$), в связи с чем сделан вывод о нецелесообразности использования данного показателя при построении многофакторной модели.

Полученные модели позволяют оценить влияние рассматриваемых факторов на расход энергоресурсов за поездку в пассажирском движении.

При построении многофакторной регрессионной модели необходимо определить сочетание в ней влияющих эксплуатационных факторов, позволяющее прогнозировать расход энергоресурсов за поездку с наибольшей степенью точности. При таком подходе критериями оценки модели являются коэффициент R^2 и величина остаточной дисперсии $S_{ост}^2$. Модель, имеющая наибольший R^2 , а также наименьшую $S_{ост}^2$, является предпочтительной [3]. Проранжированные по величине r эксплуатационные факторы добавляем в модель по одному, вычисляя после каждого добавления R^2 и $S_{ост}^2$. Построенные таким образом линейные регрессионные модели приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Линейные регрессионные модели расхода энергоресурсов за поездку

Уравнения регрессии	R^2	$S_{\text{ост}}^2$
$y = 117,8 + 2,46A$	0,862	3204
$y = 56,4 + 1,91A + 0,7L$	0,898	2379
$y = 111,5 + 1,96A + 0,73L - 1,22v_T$	0,902	2277
$y = 95,4 + 1,91A + 0,73L - 1,22v_T + 1,71t_{\text{наг}}$	0,912	2042
$y = 98,6 + 1,89A + 0,72L - 1,17v_T + 1,83t_{\text{наг}} + 31,6i_{\text{пр}}$	0,913	2019
$y = 83,5 + 1,92A + 0,7L - 0,95v_T + 1,22t_{\text{наг}} + 31i_{\text{пр}} + 2,6n_{\text{ост}}$	0,914	1995
$y = 79,5 + 1,92A + 0,7L - 0,93v_T + 1,22t_{\text{наг}} + 30,3i_{\text{пр}} + 2,56n_{\text{ост}} + 3,34v_{\text{бок}}$	0,915	1981
$y = 93,4 + 1,96A + 0,66L - v_T + 1,28t_{\text{наг}} + 28,8i_{\text{пр}} + 2,58n_{\text{ост}} + 2,6v_{\text{бок}} - 0,72T_{\text{возд}}$	0,916	1946

Из таблицы 2 видно, что среди приведенных предпочтительной является линейная регрессионная модель, включающая восемь факторов, с показателями $R^2 = 0,916$ и $S_{\text{ост}}^2 = 1946$.

При дальнейших исследованиях, в силу того, что влияние некоторых эксплуатационных факторов на расход энергоресурсов за поездку наилучшим образом описывается не линейной, а например степенной или логарифмической зависимостью, их значения перед постановкой в модель были предварительно преобразованы путем возведения в степени, извлечения натурального логарифма и т. д. После соответствующего преобразования каждого из факторов, входящих в модель, оценивалось изменение величин множественного коэффициента детерминации и остаточной дисперсии.

После предварительного преобразования некоторых влияющих факторов линейная многофакторная регрессионная модель расхода энергоресурсов за поездку в пассажирском движении выглядит следующим образом:

$$y = 203,5 + 2,05A + 0,0013L^2 - 27,5 \ln(v_T) + 1,29t_{\text{наг}} + 312,2i_{\text{пр}}^2 + 1,67n_{\text{ост}} + 2,69v_{\text{бок}} - 0,68T_{\text{возд}} \quad (1)$$

Предварительное преобразование некоторых факторов перед построением модели позволило повысить множественный коэффициент детерминации до $R^2 = 0,921$, а остаточную дисперсию снизить до $S_{\text{ост}}^2 = 1850$. Таким образом, модель (1) является наиболее предпочтительной для расчета норм расхода энергоресурсов на поездку в пассажирском движении.

При построении регрессионной модели расхода энергоресурсов за поездку необходимо также определить величины прогнозного и накопительного периодов данной модели. Под *накопительным* понимаем период времени, за который принимают исходные данные для расчета коэффици-

ентов уравнения регрессии, под *прогноznым* – период, в течение которого построенная регрессионная модель будет использована для расчета норм расхода энергоресурсов на поездку. По истечении прогнозного периода предполагается перерасчет коэффициентов уравнения регрессии, смещая при этом накопительный период вперед на величину прогнозного.

В случае если накопительный период мал, объем данных, предназначенных для построения регрессионной модели, может быть недостаточным. Если же накопительный период окажется слишком большим, то в этом случае модель будет “инерционна” и слабо восприимчива к изменяющимся условиям эксплуатационной работы в пассажирском движении. Соответственно накопительному необходимо определить и прогнозный период.

Рассмотрены три варианта накопительного периода модели: 1 год, 6 месяцев и 1 месяц. И соответственно им – прогнозные периоды в 1 месяц (для первого и второго вариантов) и 1 декаду (для третьего варианта).

Оценка эффективности прогнозирования с помощью построенных моделей осуществлялась по величинам среднего и общего за рассматриваемый прогнозный период отклонений расхода топлива от нормы. Определялись отклонения как от норм, найденных по регрессионным моделям, так и от норм, рассчитанных в локомотивном депо Гомель.

Установлено, что среди рассмотренных вариантов наибольшими значениями R^2 и наименьшими $S_{\text{ост}}^2$ характеризуются регрессионные модели с накопительным периодом в один месяц; при этом R^2 в отдельных случаях достигает значения 0,95, что характеризует такие модели практически как функциональные зависимости между эксплуатационными факторами и расходом топлива за поездку.

На рисунке 1 приведено распределение отклонений расхода топлива от норм, рассчитанных по регрессионным моделям, а также в локомотивном депо Гомель. Как видно из рисунка, использование

при нормировании расхода топлива за поездку многофакторных регрессионных моделей позволяет минимизировать суммарное отклонение расхода топлива от нормы за рассматриваемый прогнозный период (в среднем отклонение составляет минус 0,25 %). В то время как при использовании норм, рассчитываемых в условиях локомотивного

депо, в большинстве случаев наблюдается значительно большее положительное отклонение – в среднем около 1 %.

Такое положение дел выявляет существенный недостаток используемой в настоящее время в локомотивных депо Белорусской железной дороги системы нормирования расхода энергоресурсов на поездку.

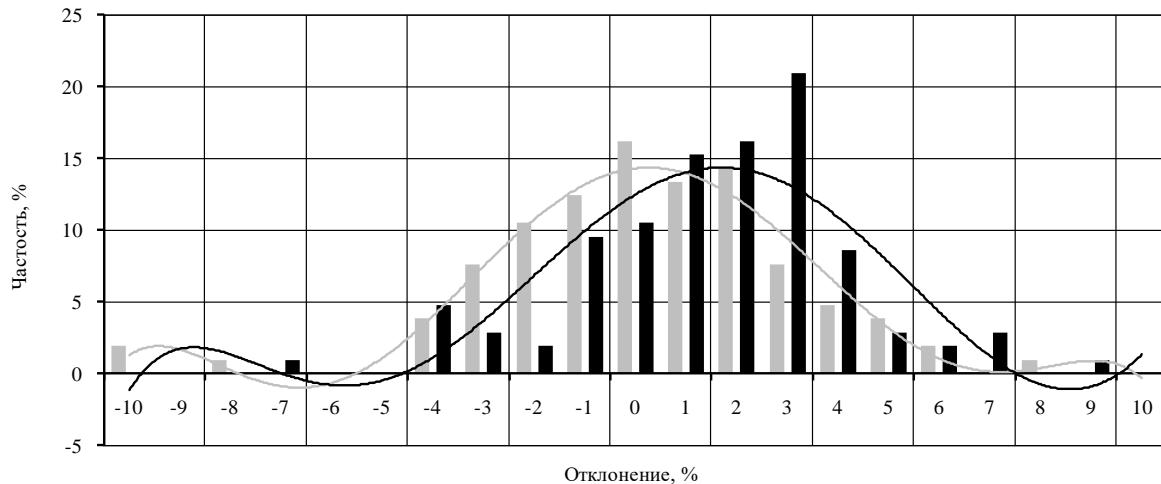


Рисунок 1 – Суммарное отклонение расхода топлива за поездку от нормы (накопительный период регрессионной модели – 1 месяц, прогнозный – 1 декада):
 — расчет норм по регрессионным моделям, — расчет норм в условиях локомотивного депо Гомель

Использование регрессионных моделей позволяет объективно разделить локомотивные бригады на “лучших” и “худших” по результатам расходования ими энергоресурсов. Это стимулирует бригады с отрицательным балансом попасть в число имеющих положительный баланс расхода энергоресурсов за рассматриваемый период, так как только в этом случае к бригадам применяется материальное поощрение за рациональное использование дизельного топлива и электрической энергии.

Таким образом, использование многофакторных регрессионных моделей расхода энергоресурсов в пассажирском движении позволяет снизить субъективность процесса нормирования, повысить его качество и тем самым стимулировать рацио-

нальное использование топливно-энергетических ресурсов в тяге поездов.

Список литературы

- 1 Повышение качества нормирования расхода энергоресурсов магистральными локомотивами / С. Я. Френкель [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2007. – № 1–2. – С. 137–140.
- 2 Френкель, С. Я. Эксплуатационные факторы, влияющие на расход энергоресурсов за поездку в пассажирском движении / С. Я. Френкель, А. П. Дединкин // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: материалы II междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В. И. Сенько. – Гомель : БелГУТ, 2008. – С. 187.
- 3 Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

Получено 01.04.2011

S. J. Frenkel, A. P. Dedinkin, R. K. Gizatullin. Multifactor model energy consumption in passenger traffic.

For the purpose of the improvement of current system for rationing diesel fuel and electric energy consumption in passenger traffic the application of multifactor regression model has been introduced. The multifactor regression model of energy consumption with eight main factors involved has been developed. Engine driver’s running schedules and weather reports statistical data have been used during its development. The list of operational factors influencing energy consumption in passenger traffic has been determined and studied. Storage and predictive time periods securing the application ability of this model for rationing energy consumption per travel have been determined.