

УДК 621.331

В. А. ПАЦКЕВИЧ, кандидат технических наук, С. А. АЗЕМША, кандидат технических наук, В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ТРОЛЛЕЙБУСАМИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

Приведена зависимость удельного расхода электроэнергии троллейбусов от различных факторов, основанная на статистическом анализе полученных данных, которая может быть использована для целей нормирования и прогнозирования электропотребления. Выполнен множественный регрессионный анализ между удельной сложностью передвижения, скоростью и удельным фактическим расходом электроэнергии для маршрутов.

Для городских транспортных маршрутных предприятий энергосберегающие технологии, используемые для нормирования электропотребления и расхода топлива, являются актуальной задачей. Причем структура норм энергопотребления должна соответствовать технологии и организации работы транспортного предприятия и охватывать все статьи расхода электроэнергии.

Целью данного исследования является разработка более объективной зависимости удельного расхода электроэнергии троллейбусами для целей нормирования, прогнозирования электропотребления, а также разработка рекомендаций по оперативному корректированию основных параметров удельного расхода электроэнергии троллейбусами.

Ряд авторов указывают, что условия эксплуатации маршрутных транспортных средств связаны с рядом показателей: расходом электроэнергии или топлива, ресурсом шин, расходом запасных частей, выбросом продуктов износа шин и тормозных накладок, потерями линейного времени (надежность) и другими.

Важным фактором является «манера» вождения водителя транспортным средством, которая в общем случае определяется следующими факторами:

- 1) техническими: тип транспортного средства; техническое состояние подвижного состава; полная масса автомобиля; динамические качества автомобиля; габариты транспортного средства; наличие прицепа;
- 2) технологическими: тип маршрута; наличие специального оборудования;
- 3) организационными: интенсивность движения; пассажиропоток; протяженность маршрута; частота остановочных пунктов; контроль за регулярностью движения; напряженность технико-эксплуатационных показателей;
- 4) дорожно-климатическими: тип дорожного покрытия; состояние покрытия; природно-климатические;
- 5) экономическими: формы и системы оплаты труда; организация труда; формы начисления и распределения заработной платы; экономические результаты деятельности предприятия;
- 6) социальными: квалификация; возраст водителя; стаж работы; режим труда; продолжительность рабочего дня; разрывной график работы;
- 7) эргономическими: удобство расположения рычагов управления; уровень шума и вибрации; температура

в кабине; вентиляция в кабине; запыленность; коэффициент обзорности; освещенность приборов;

8) организационно-техническими: пропускная способность дороги; частота перекрестков со светофорным регулированием.

К активным факторам относятся организационные, экономические, социальные, к пассивным – технико-технологические, дорожно-климатические, организационно-технические. Все эти факторы непосредственно воздействуют и на эффективность труда водителей через психофизиологические и социальные результаты труда (утомляемость, заболеваемость, безопасность движения и др.).

По результатам исследования расхода электроэнергии на троллейбусных маршрутах проведен статистический анализ влияющих факторов, изучена коррелированность различных параметров. В качестве одного из способов оценки сложности маршрута использовался хорошо себя зарекомендовавший алгоритмический метод. Сущность данного метода заключается в разложении рабочего процесса на качественно различные элементарные составляющие. Была составлена схема маршрута с указанием остановок и их особенностей, поворотов, подъемов, спусков, светофоров, и т.д. Для определения сложности маршрута были выделены транспортные ситуации, которые характеризуют данный маршрут. Каждая типовая транспортная ситуация реализуется несколькими алгоритмами характерных операций по управлению городских маршрутных транспортных средств (ГМТС).

По каждой операции на основе разработанных алгоритмов был произведен количественный анализ деятельности водителя в виде числа членов алгоритма. Так как маршруты отличаются между собой по длине и времени выполнения рейса, то в качестве сравнительных характеристик использовались удельные величины. Результаты расчета алгоритмическим методом для троллейбусных маршрутов представлены в таблице 1.

По данным счетчиков электроэнергии за 2012 и 2013 гг. для всех типов троллейбусов (АКСМ-20101, АКСМ-20102 и т. д.) определяли фактический расход электроэнергии по маршрутам. Исследуемые параметры коррелируют между собой для месяцев с положительной температурой окружающей среды (рисунок 1, коэффициент корреляции составил 0,637, таблица 1 и 2), для зимних месяцев линейная положительная или отрицательная связь не установлена.

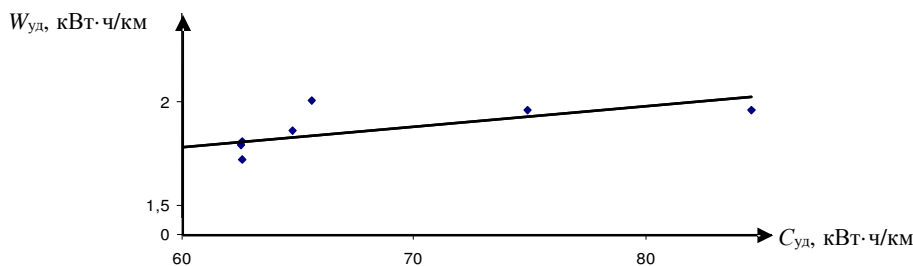


Рисунок 1 – Корреляционное поле и линейное уравнение регрессии между удельным фактическим расходом электроэнергии для АКСМ-20101 и удельной сложностью передвижения по длине рейса в летние месяцы года

Таблица 1 – Результаты статистического анализа в программе Exel между удельным фактическим расходом электроэнергии для АКСМ-20101 и удельной сложностью передвижения по длине рейса в летние месяцы года

Регрессионная статистика		Дисперсионный анализ					
Множественный R	0,797		df	SS	MS	F	Значимость F
R-квадрат	0,636	Регрессия	1	0,080858	0,080858	12,266	0,009961
Нормированный R-квадрат	0,5847	Остаток	7	0,046142	0,006592		
Стандартная ошибка	0,0811	Итого	8	0,127			

Таблица 2 – Исходные данные за январь 2012 и 2013 гг.

Маршрут	1	2	5	7	10	12	15	19	20
Удельный фактический расход электроэнергии за июнь, кВт·ч/км	2,01	1,81	1,7	1,72	1,96	1,66	1,86	1,79	1,96
Удельная сложность передвижения по длине рейса, операций/км	65,6	62,6	53,0	62,6	74,9	52,3	64,8	62,6	84,6

Также получена высокая обратная линейная связь между удельным фактическим расходом электроэнергии и средней эксплуатационной скоростью на маршруте. Корреляционное поле и полученное линейное уравнение регрессии ($r = 0,8356$; коэффициент детерминации для нелинейной зависимости составил – 0,914, F -критерий 50,83) для летних месяцев представлено на рисунке 2. То есть чем больше средняя скорость, тем меньше удельное потребление электро-

энергии, что можно объяснить большим КПД электродвигателя при большей скорости (постоянная составляющая потерь почти не меняется от коэффициента загрузки). Для зимних месяцев года (декабрь, январь) данная зависимость незначима. Здесь можно предположить более значимый характер влияния на электропотребление других факторов (подогрев салона, коэффициент сцепления колеса с дорожным покрытием и пр., состояние дорог).

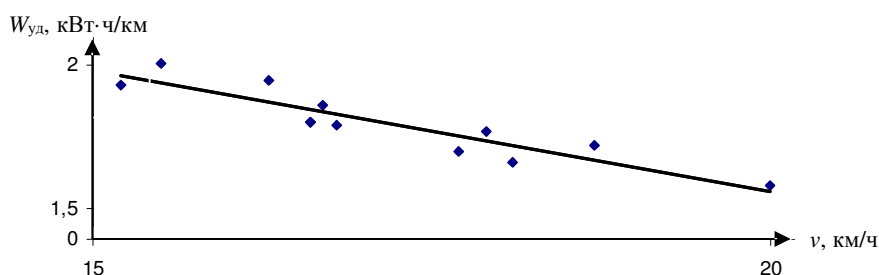


Рисунок 2 – Корреляционное поле и линейное уравнение регрессии между удельным фактическим расходом электроэнергии для АКСМ-20101 и средней скоростью на маршрутах в летние месяцы года

Оцененная множественная регрессионная модель июня для АКСМ-20101 между удельной сложностью передвижения, скоростью и удельным фактическим расходом электроэнергии для маршрутов указывает на высокую значимость (коэффициент множественной корреляции равен 0,9, F -критерий – 23,54929 и уровень значимости $p = 0,000106$). Уравнение приняло следующий вид:

$$C_{уд. эл} = 3,91 - 0,0244C_{уд. сложн} - 0,1C_{ср. скор.}$$

По результатам анализа (таблица 3) приведена зависимость удельного среднего фактического расхода электроэнергии по месяцам года от января до декабря с нанесенной средней годовой линией удельного фактического расхода (рисунок 3, январь принят первым месяцем года). Наибольшее удельное электропотребление приходится на ноябрь, декабрь, январь, февраль, что коррелирует со средней температурой окружающей среды ($r = 0,878$).

Таблица 3 – Удельный средний фактический расход электроэнергии, среднее квадратическое отклонение (σ) расхода электроэнергии и температура за 2012 и 2013 гг.

Маршрут	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
Средний удельный расход электроэнергии, кВт·ч/км	1,86	2,10	1,72	1,60	1,55	1,54	1,47	1,40	1,48	1,61	1,68	1,94
σ , кВт·ч/км	0,27	0,29	0,28	0,23	0,25	0,32	0,27	0,28	0,34	0,33	0,28	0,33
Среднемесячная температура, °С	-4,35	-9,75	0,1	9,55	16,2	18,9	22,1	19,0	14,1	7,55	3,05	-2,3

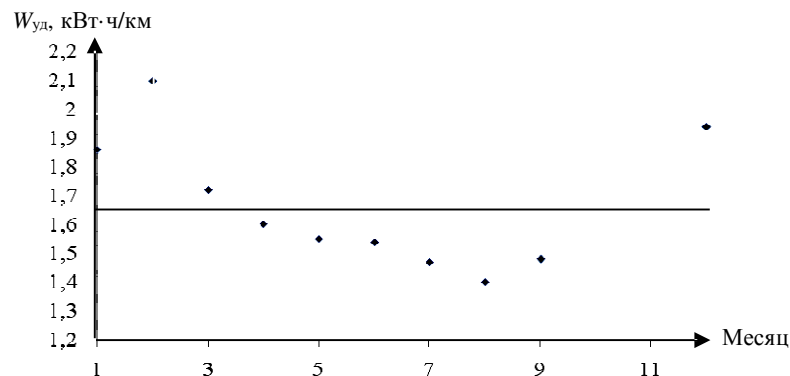


Рисунок 3 – Зависимость удельного среднего фактического расхода электроэнергии от месяца года с нанесенной средней годовой линией удельного фактического расхода

С помощью экспертного метода (главные инженеры предприятия, водители, специалисты вузов, связанные с транспортными перевозками) выделили следующие факторы, влияющие на увеличенное электропотребление в зимние месяцы: отопление салона, внутреннее и наружное освещение, пробуксовка, плохое состояние дорог, изменение вязкости смазок в узлах трения.

Существующая система распределения премий за экономию электроэнергии или топлива может быть дополнена за счет использования доверительного интервала для среднего. Данный расчет позволит статистически более обоснованно принимать решение о премировании при сравнении фактического среднего с средним по норме, так как учитывается влияние случайных факторов, не зависящих от водителя. Данная процедура может быть легко автоматизирована в любом табличном редакторе. При этом предлагается использовать формулу интервальной оценки.

Например, для троллейбусного маршрута № 7 по результатам расчета показаний счетчиков электроэнергии за 2011 и 2012 гг. удельный фактический расход электроэнергии изменялся в интервале от 1,89 до 2,68 (кВт·ч/км), норма составила 2,05, а среднее значение – 2,3. Также необходимо отметить, что нормируемое значение для получения премии за экономию электроэнергии не вошла в интервальную 95 и 99%-ю оценку среднего. Такое положение нормируемого значения привело к тому, что для подавляющего большинства водителей троллейбуса № 7 премия за экономию не выплачивалась из-за значительного несоответствия среднего и нормируемого значения расхода электроэнергии.

Получено 10.10.2016

V. A. Patskevich, C. A. Azemsha, V. N. Galushko. Analysis of influence different factors on specific energy consumption of trolley buses.

Functional dependence was been received for trolleybus energy consumption on different factors. This dependence bases on statistic analysis and it could be used for regulation and forecasting energy consumption. The multiple regression analysis was carried out for the specific complexity of transportation, velocity and specific energy consumption of the routes.

На основании полученных результатов коррелированности данных удельный расход электроэнергии троллейбусом предложено делить на три составляющие:

– основная составляющая, зависящая от сложности передвижения на маршруте ($\alpha C_{\text{сложн}}$);

– дополнительные составляющие – удельное потребление электроэнергии, пропорциональное температуре окружающей среды ($C_{\text{с}} t^{\beta_{\text{с}}}$) и средней эксплуатационной скорости (C_{v}).

Суммарное электропотребление каждым типом троллейбуса

$$w = (\alpha C_{\text{сложн}} + C_{\text{с}} t^{\beta_{\text{с}}} + C_{\text{v}})L,$$

где L – пробег троллейбуса, км; α, β – коэффициенты линейной и степенной регрессии, полученные для каждого исследуемого типа троллейбуса с помощью программ статистического анализа (Excel, Statistica или Statgraphics).

Процедура пошагового регрессионного анализа в большинстве расчетов отбрасывала составляющую C_{v} , как значимо не влияющую, а коэффициент детерминации для оставшегося уравнения составлял выше 0,9, расчетное значение статистики Фишера всегда значительно больше критического.

На основании полученных в исследовании статистических результатов можно формировать наиболее объективную зависимость удельного расхода электроэнергии троллейбусами в зависимости от пробега для целей нормирования и прогнозирования электропотребления, в некоторых случаях выявлять подтасовки водителей или ошибки в работе счетчиков электроэнергии.