

УДК 621.3

В. С. МОГИЛА, кандидат технических наук, В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, К. Р. БОЙКОВ, ассистент, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Приведена методологическая оценка возможности изменения соотношения моторных и прицепных вагонов электропоездов переменного тока серии ЭР9, которая включала анализ условий их эксплуатации, многовариантные тяговые расчеты и статистическую обработку данных. Разработана методика применения программного статистического инструментария определения рациональных схем формирования составов электропоездов.

Стоимость топливно-энергетических ресурсов постоянно увеличивается. Одной из главных задач во всем мире является поиск путей уменьшения потребляемой электроэнергии. В рамках Белорусской железной дороги значительная часть расхода приходится на тягу поездов.

Многие специалисты [1, 2] указывают на завышенную мощность тяговых двигателей и другого силового оборудования широко эксплуатируемых на дорогах бывшего СССР электропоездов серии ЭР. По их мнению, уменьшение количества моторных вагонов в составе электропоезда не приведет к нарушению существующего графика движения, а также к перегрузке (более быстрому износу) тягового оборудования оставшихся, но позволит сократить: расход электроэнергии, износ верхнего строения пути и контактной сети.

В настоящей статье описан метод, который использовался при определении возможности изменения соотношения моторных и прицепных вагонов электропоезда переменного тока серии ЭР9. При помощи инструментов математической статистики проведен анализ условий эксплуатации, обработаны многовариантные тяговые расчеты и данные натуральных экспериментов.

В настоящее время практикуется формирование составов по следующим схемам: 10 вагонов (головной – моторный – прицепной – моторный – прицепной – моторный – моторный – прицепной – моторный – головной) и 8 вагонов (головной – моторный – прицепной – моторный – моторный – прицепной – моторный – головной).

Так как электропоезд серии ЭР разрабатывался для участков с более «тяжелым» профилем пути по сравнению с условиями перевозок на железной дороге Республики Беларусь, его мощность является завышенной. Работа тягового оборудования в режиме нагрузки значительно ниже номинальной ведет к снижению его КПД и увеличению удельного расхода электроэнергии на тягу. Оценка режимов работы моторвагонного подвижного состава на существующих участках и его электропотребления позволяет сделать предположение, что мощность моторных вагонов может быть уменьшена, путем выбора оптимального соотношения вагонов.

Тяговые расчеты, необходимые для проведения этих исследований, были проведены в пакете программ «Forсе», разработанном сотрудниками БелГУТа.

Использование этого пакета позволило сделать большее количество расчетов для решения поставленной выше задачи. Особенностью программного пакета является возможность учитывать при проведении тяговых расчетов изменение числа моторных вагонов в поезде согласно рекомендациям, приведенным в [3–8].

Исходными данными для тяговых расчетов на реальных участках железной дороги явились: профиль; ограничения скорости; координаты остановочных пунктов, время стоянки; характеристики и параметры электрического моторвагонного подвижного состава (таблица 1). Для более глубокого анализа были выполнены тяговые расчеты на участках длиной 10 км, при различных значениях величины уклона от –10 до 10 ‰ с интервалом изменения равным 1 ‰. На этих участках для каждого состава изменялась скорость движения, количество остановок. Населенность состава была принята равной 100 ‰.

В результате проведения тяговых расчетов были получены: кривые движения и определены общий и удельный расходы электроэнергии.

Следующим шагом стала статистическая обработка с помощью предложенного программного инструментария. Тело программного инструментария реализовано для удобства исследователя в различных программах статистической обработки данных (в зависимости от задач статистического анализа применялись программы *STATISTICA*, *Statgraphics 5.0*, *Excel* [9, 10]), и состоит из универсальной и предметно-ориентированной частей. Универсальная часть представляет собой процедуры верификации, проверки адекватности исходных данных, добавления библиотек процедур испытания.

В составе предметно-ориентированной части инструментария реализованы библиотеки процедур общего назначения: первичной статистической обработки входных данных (*LIB.STATOBR*), регрессионного анализа (*LIB.REGR*), дисперсионного анализа (*LIB.DISP*).

При этом модель удовлетворяла двум основным требованиям:

- воспроизводимости исследований результатов эксперимента, т. е. разброс значений отклика при повторении опытов не превышает точности эксперимента;
- обеспечена управляемость объекта исследования с помощью модели объекта, использующей управление.

С помощью однофакторного дисперсионного анализа устанавливаются уравнения регрессии между различными уровнями влияющих факторов (число остано-

вок, величина уклона) для каждого варианта составности и расходом электроэнергии, позволяющие выявить наиболее рациональные условия для целевой функции минимальности расхода электроэнергии (таблица 2). При этом в пакете программ «Force» план модельного эксперимента предусматривает все существующие варианты условий перевозок.

Согласно плану модельного эксперимента для многофакторного анализа [9] в пакете программ «Force» варьируем уровни влияющих факторов, выполняя полный или дробный факторный эксперимент в зависимо-

сти от целей исследования. Данная процедура позволяет получить математическую модель, позволяющую выделить наиболее значимые факторы (в исследованиях уровень значимости принимался  $\alpha = 0,01$ ), влияющие на расход электроэнергии при различных вариантах составности. С помощью процедуры пошагового регрессионного анализа подбираются наилучшие уравнения регрессии, сравнение нескольких альтернативных моделей регрессии реализовано с помощью приведенных значений коэффициентов детерминации.

Таблица 1 – Пример результатов расчета в пакете программ «Force»

Направление: Осиповичи – Минск								
Фактор	Время хода, мин					Расход электроэнергии		
	общее	под током	на выбеге	при торможении	стоянка	кВт ч	кВт ч/пкм	Вт ч/т км
2Г+4М*+4П	228,04	23,98	156,28	12,78	35	1122,78	10,483	19,469
2Г+4М+4П	228,05	18,23	161,87	12,95	35	1141,46	10,657	19,795
2Г+5М*+3П	228,04	19,11	161,01	12,91	35	1198,51	11,19	19,931
2Г+5М+3П	227,8	15,55	164,07	13,18	35	1222,78	11,417	20,329
2Г+6М+2П	228,03	13,48	166,76	12,79	35	1269,11	11,849	20,262
2Г+4М+3П	228,05	17,02	162,8	13,22	35	1069,55	9,986	20,219
2Г+5М+4П	228,04	16,69	163,14	13,21	35	1310,51	12,236	20,188

Таблица 2 – Пример расчета  $F$ -критерия для расчета значимости различий энергопотребления на тягу для разных схем формирования состава

Направление: Минск – Осиповичи							
Фактор	Масса, т	Средняя скорость, км/ч	Значение $F$ -критерия (критерий Фишера)				
			Ост. 3000	Ост. 5000	Ост. 7000	Ост. 10000	Ост. 15000
2Г+4М*+4П	466	40	0,04687	0,06982	0,11099	0,02438	0,21614
2Г+4М+4П	466						
2Г+5М*+3П	489	60	0,03072	0,11788	0,29910	0,077	0,22054
2Г+5М+3П	489						
2Г+6М+2П	512						
2Г+4М+3П	429	80	0,20078	0,34826	0,06347	0,41146	0,04848
2Г+5М+4П	526						

Например, варьирование уклонов изменяет статистически значимые влияющие параметры коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  уравнения регрессии вида  $y = a + bx + cx^2 + dx^3$  (коэффициенты во второй и третьей степенях уменьшаются с увеличением уклона), а также для количества остановок и скоростного режима движения.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы о снижении потребляемой электроэнергии были проведены натурные эксперименты для варианта с отключенной моторной секцией 10-вагонного электропоезда на участке Минск – Осиповичи – Минск. Данные исследования подтверждены показаниями счетчиков электроэнергии, установленных непосредственно на моторных секциях. В исследовании учитывался номер состава, населенность

состава и другие параметры. Для одиннадцати номеров составов данного направления вариант с отключенной секцией обеспечивал экономию электроэнергии. Причем для устранения случайного характера различий использовался  $U$ -критерий Манна-Уитни (уровень значимости принимался  $\alpha = 0,05$ ) и  $t$ -критерий Стьюдента [9].

Анализ условий эксплуатации электропоездов переменного тока серии ЭР9 показал возможность их эксплуатации с измененным соотношением моторных и прицепных вагонов при выполнении графика движения без перегрузки тяговых двигателей.

Эксплуатация электропоездов с измененной составностью позволит высвободить моторные вагоны. В связи с более интенсивным выходом из строя мотор-

ных вагонов по сравнению с прицепными, предлагаемое мероприятие позволит сформировать дополнительные составы, уменьшить капитальные затраты, связанные с закупкой дополнительных электропоездов, а также снизить расход электроэнергии на тягу [2].

Разработанный метод с применением программного статистического инструментария при определении рациональных схем формирования составов электропоездов можно рекомендовать для проведения аналогичных исследований в других депо.

#### Список литературы

1 **Егоров, М. В.** Поговорим о пригородном подвижном составе / М. В. Егоров // ЖДМ. – 2008. – № 8. – С. 5–7.

2 Методика определения рационального соотношения моторных и прицепных вагонов пригородных электропоездов постоянного тока / Хомяков Б. И. [и др.] // Вестник ВНИИЖТа. – 1993. – № 6. – С. 21–26.

3 Методика определения рационального соотношения моторных и прицепных вагонов пригородных электропоездов постоянного тока / Хомяков Б. И. [и др.] // Вестник ВНИИЖТа. – 1993. – № 6. – С. 21–26.

4 Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.

5 **Осипов, С. И.** Основы локомотивной тяги / С. И. Осипов, К. А. Миронов, В. И. Ревич. – 3-е изд., доп. и перераб. – М. : Транспорт, 1979. – 440 с.

6 Справочник по тяговым расчетам / П. Н. Астахов, П. Т. Гребенюк, А. И. Скворцова. – М. : Транспорт, 1973. – 256 с.

7 Тяговые расчеты: справочник / под ред. П. Т. Гребенюка. – М. : Транспорт, 1987. – 272 с.

8 **Осипов, С. И.** Основы тяги поездов / С. И. Осипов, С. С. Осипов. – М. : УМК МПС России, 2000. – 592 с.

9 **Боровиков, В. П.** STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере для профессионалов / В. П. Боровиков. – 2-е изд. – СПб., 2003. – 688 с.

10 **Шевченко, Д. Н.** Теория вероятностей и математическая статистика: учеб.-метод. пособие для студ. электротехн. спец. / Д. Н. Шевченко. – Гомель : БелГУТ, 2006. – 318 с.

Получено 12.11.2011

**V. S. Mogila, V. N. Galushko, K. R. Boikov.** Programming tool set for the statistical analysis for the determination of the rational schemes of forming electric trains is developed.

The programming tool set for the statistical analysis of the basic financial and economic performances of transport enterprises is developed. The structure is defined and the programming tool set methodology is given. The search algorithm of the most effective representation of the generalized results by means of the generalized criterion and the algorithm of the efficiency estimation of organizational-economic activities held in an enterprise are developed.