

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С КОМБИНИРОВАННЫМИ РЕЖИМАМИ ЭНЕРГОПИТАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА ДАЛЬНОСТИ ПРОБЕГА

Гуртовой М. Ю., Попов С. В.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В статье представлен поиск оптимальных значений параметров скорости движения электромобиля с комбинированными режимами энергопитания и емкости аккумуляторной батареи по критерию максимума дальности пробега.

**Постановка проблемы.** Определяющим фактором в создании электромобильного транспорта, конкурентоспособного с современным автотранспортом, является решение проблемы его автономной энергетики. Параметры агрегатов автономной системы электропривода электромобиля (ЭМ) и требования к ним существенно различаются в зависимости от назначения и областей применения электромобильного транспорта. Актуальной данная проблема является и для АПК, где электромобильный транспорт находит все большее применение с целью повышения эффективности использования энергии и снижения вредных выбросов в сельскохозяйственном производстве.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Запас хода ЭМ может быть увеличен путем комбинирования химических источников тока с другими источниками энергии. Согласно публикациям [1-5] в этом направлении ведутся работы широким фронтом. По результатам опытной эксплуатации ЭМ на базе легковых автомобилей (рис. 1), представленных в работе [6], были сделаны выводы о целесообразности применения таких электромобилей в городских условиях. Также было отмечено, что существуют значительные возможности по усовершенствованию энергосистемы для городского электромобиля, которые позволят снизить ее массу, повысить долговечность и отдачу энергии.

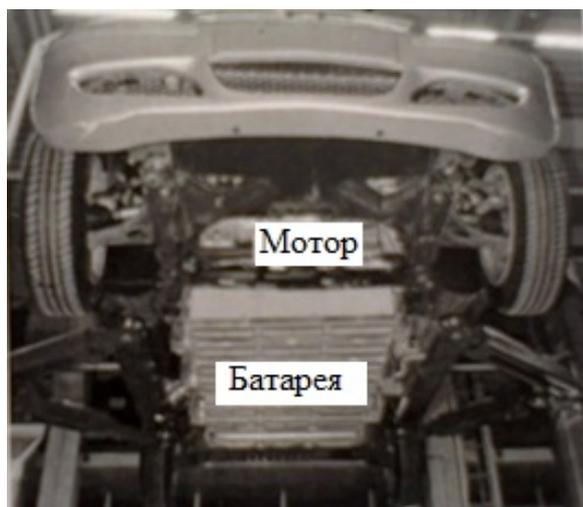


Рисунок 1 – ЭМ с установленной батареей [6]

В то же время аналитические зависимости дальности пробега ЭМ с комбинированными режимами

энергопитания от глубины разряда аккумуляторной батареи (АКБ) и скорости движения практически отсутствуют. Поэтому задача анализа и моделирования параметров и характеристик ЭМ с гибридной системой энергопитания является важной и представляет практический интерес.

**Цель статьи.** Целью работы является определение оптимальных значений емкости АКБ и скорости движения ЭМ с комбинированными режимами энергопитания. Основные задачи исследования:

- определение зависимости дальности пробега от глубины разряда АКБ;
- определение оптимальных значений емкости АКБ и скорости движения.

**Основной материал исследования.** Ниже приведены результаты оценки энергетических и мощностных параметров энергоустановки городского электромобиля с комбинированными режимами энергопитания, эксплуатируемого на усовершенствованном дорожном покрытии (коэффициент сопротивления движению  $\psi = 0,014$ ) с обеспечением высоких тягово-динамических качеств (максимальная скорость  $v = 129$  км/ч).

Алгоритм моделирования дальности пробега разработан авторами и представлен в работе [7]. В общем случае с помощью алгоритма определяется степень разряда АКБ и степень заряженности суперконденсатора (СК) исходя из отданной в нагрузку мощности и рекуперации при торможении.

При проведении вычислений предполагают, что ЭМ имеют такой же кузов, раму и распределение веса, как и обычные автомобили. Таким образом, сделав допуск на типичную полезную нагрузку, остальной допустимый вес ЭМ (до брутто исходного автомобиля) распределяют на систему энергопитания (первичный и вторичный накопители энергии, контрольные приборы, редукторы и электродвигатель). Примерный вид компоновки показан на рис. 2.

Для того, чтобы найти влияние параметров емкости АКБ и скорости движения на дальность пробега ЭМ с гибридной системой питания, проводились имитационные эксперименты с фиксированным СК и свинцово-кислотными аккумуляторами различной емкости. Основные параметры моделируемого электромобиля, приведены в табл. 1.

Выбор емкости СК основан на двух условиях: 1) обеспечение пиковой мощности; 2) масса энергоустановки принималась равной 25% по отношению к собственной массе ЭМ; в этом случае масса блока СК составляла 34,8 кг.



Рисунок 2 – Примерный вид компоновки ЭМ

Таблица 1 – Параметры модели

№	Параметр	Значение
1	Снаряженная масса (+ полезный груз весом 0,14 т), т	1,48
2	Лобовая площадь, м <sup>2</sup>	1,8
3	Коэффициент трения / аэродинамического сопротивления	0,19 / 0,31
4	КПД передачи $\eta_g$	0,95
5	Емкость АКБ, А·ч	55
6	Минимальная емкость СК, Ф	6,14
6	Общая емкость СК, Ф	10,3
7	Энергия, кВт·ч	17,16
8	Объем СК, м <sup>3</sup>	0,025
9	Вес СК, кг	34,8

Далее применяя данные табл. 1, был проведен вычислительный эксперимент, основой которого является алгоритм моделирования дальности пробега  $d$ , как указано в работе [8]. В ходе нескольких экспериментов с математической моделью ЭМ с фиксированным СК и свинцово-кислотными аккумуляторами различной емкости был получен массив исходных данных (табл. 2) для последующей оптимизации.

Зависимости дальности пробега  $d$  от скорости  $v$   $d=f(v)$  и дальности пробега  $d$  от емкости АКБ  $C$   $d=f(C)$  для массива исходных данных (1) приведены на рис. 3. Зависимость  $d=f(v)$  имеет максимум, характерный для вождения ЭМ с постоянной скоростью.

Для построения регрессионной зависимости при отсутствии априорной информации применяют, как правило, линейное уравнение регрессии:

$$\overline{y_x} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n. \quad (1)$$

Таблица 2 – Массив исходных данных

$v$ , км/ч	$C$ , А·ч					
0	28	32	35	43	45	55
10	32	36	40,5	50,5	52,5	63,4
20	47,8	56	60,1	75,6	79,3	95,5
30	51,7	60,1	65,1	79,3	84,3	100
40	44,8	49,4	54,4	69	72,4	84,3
50	44	49,8	54	64	67,8	80,2
70	36	47,8	47,8	56,3	59	74,4
90	28,7	32,2	36	46,7	46,7	57,4
100	23,7	28	32	40,5	40,5	52,2
129	15,5	15,5	20,6	20,6	20,6	20,6

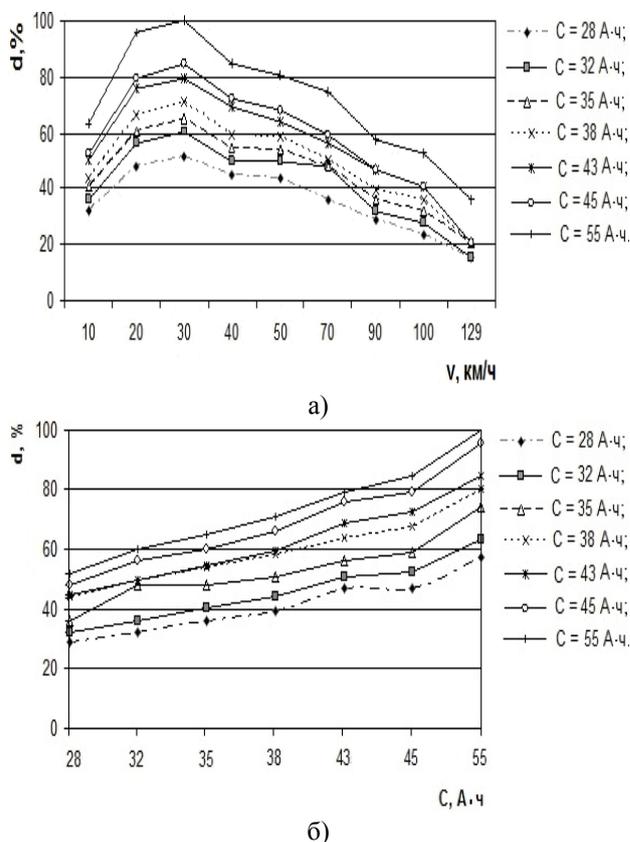


Рисунок 3 - Графики зависимостей дальности пробега ( $d$ ) от скорости ( $v$ ) и дальности пробега ( $d$ ) от емкости АКБ ( $C$ ) массива для исходных данных: а) зависимость дальности пробега ( $d$ ) от скорости ( $v$ ); б) зависимость дальности пробега ( $d$ ) от емкости АКБ ( $C$ )

При этом необходимо обеспечить такие  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$  при которых отклонения  $u$  и  $\overline{y_x}$  были бы минимальными, как указано в работе [9].

Условие минимума среднеквадратичного отклонения  $\overline{y_x}$  от фактических значений признака  $y$  для всей совокупности из  $n$ -единиц сводится к равенству

$$S_m = \sum_m (a_0 + a_1 x_{1m} + a_2 x_{2m} + \dots + a_{mm} x_{mm} - y_m)^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

Для нахождения коэффициентов  $a_0, a_1, a_2 \dots a_n$  решается система уравнений, как указано в работе [10] :

$$\begin{cases} \frac{\partial S_n}{\partial a_0} = \sum_n 2S_n^1 \frac{\partial S_n^1}{\partial a_0} = 0; \\ \frac{\partial S_n}{\partial a_1} = \sum_n 2S_n^1 \frac{\partial S_n^1}{\partial a_1} = 0; \\ \dots \dots \dots \\ \frac{\partial S_n}{\partial a_m} = \sum_n 2S_n^1 \frac{\partial S_n^1}{\partial a_m} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

После преобразований система уравнений приводится к виду:

$$\begin{cases} a_{0n} + a_1 \sum_n x_{1n} + a_2 \sum_n x_{2n} + \dots + a_m \sum_n x_{mn} = \sum_n y_n; \\ a_0 \sum_n x_{1n} + a_1 \sum_n x_{1n}^2 + a_2 \sum_n x_{1n} x_{2n} + \dots + a_m \sum_n x_{1n} x_{mn} = \sum_n x_{1n} y_n; \\ a_0 \sum_n x_{2n} + a_1 \sum_n x_{1n} x_{2n} + a_2 \sum_n x_{2n}^2 + \dots + a_m \sum_n x_{2n} x_{mn} = \sum_n x_{2n} y_n; \\ \dots \dots \dots \\ a_0 \sum_n x_{mn} + a_1 \sum_n x_{1n} x_{mn} + a_2 \sum_n x_{2n} x_{mn} + \dots + a_m \sum_n x_{mn}^2 = \sum_n x_{mn} y_n. \end{cases} \quad (4)$$

Поскольку отдельные параметры имеют, как правило, различную размерность (например, км/ч, А·ч), необходима их нормировка с помощью соотношений:

$$\xi_{y_n} = \frac{y_n - \bar{y}}{S_y}; \quad \xi_{x_n} = \frac{x_{jn} - \bar{x}_j}{S_{xj}}, \quad (5)$$

где  $j=0,1,2 \dots n$ .

Соответственно преобразуется и система уравнений, которая для  $m=2$  примет вид:

$$\begin{cases} b_{0n} + b_1 \sum_n \xi_{x_{1n}} + b_2 \sum_n \xi_{x_{2n}} = \sum_n \xi_{y_n}; \\ b_0 \sum_n \xi_{x_{1n}} + b_1 \sum_n \xi_{x_{1n}}^2 + b_2 \sum_n \xi_{x_{1n} x_{2n}} = \sum_n \xi_{x_{1n} y_n}; \\ b_0 \sum_n \xi_{x_{2n}} + b_1 \sum_n \xi_{x_{1n} x_{2n}} + b_2 \sum_n \xi_{x_{2n}}^2 = \sum_n \xi_{x_{2n} y_n}. \end{cases} \quad (6)$$

Для уменьшения погрешности воспроизведения выходного параметра  $d$  с помощью регрессионных зависимостей рассмотрим нелинейные уравнения. При этом искомая зависимость в общем случае для уравнения  $k$ -го порядка запишется в виде :

$$\begin{aligned} \bar{y}_x &= a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m + \\ &+ (a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m)^2 + \\ &+ (a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m)^k \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом конкретных значений параметров  $m = 2$  (параметры  $v$  и  $C$ ) и  $k = 2 \dots 5$  рассмотрим уравнение (8). После преобразований системы уравнений (6) получим:

для  $k=2$  :

$$\bar{y}_x = a_0 + a_1 v + a_2 C + a_3 v^2 + a_4 C^2 + a_5 v C \quad (8)$$

для  $k=3$  :

$$\begin{aligned} \bar{y}_x &= a_0 + a_1 v + a_2 C + a_3 v^2 + a_4 C^2 + \\ &+ a_5 v C + a_6 v^3 + a_7 C^3 + a_8 v^2 C + a_9 v C^2 \end{aligned} \quad (9)$$

для  $k=5$  :

$$\begin{aligned} \bar{y}_x &= a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 + \\ &+ a_4 v^4 + a_5 v^5 + a_6 C + a_7 v C + \\ &+ a_8 v^2 C + a_9 v^3 C + a_{10} v^4 C + a_{11} v^5 C \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения регрессии 2-го и 6-го порядка имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{d}_v &= -1,373 \cdot 10 + (4,811 \cdot 10^{-1})v + 1,114C + \\ &+ (-3,173 \cdot 10^{-3})v^2 + (1,037 \cdot 10^{-3})C^2 + \\ &+ (-6,089 \cdot 10^{-3})vC, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{d}_v &= 4,626 - 1,41v + (4,54 \cdot 10^{-2})v^2 + \\ &+ (-4,98 \cdot 10^{-4})v^3 + (1,76 \cdot 10^{-6})v^4 + \\ &+ (1,42 \cdot 10^{-13})v^5 + (1,56 \cdot 10^{-1})C + \\ &+ (9,44 \cdot 10^{-2})vC + (-2,63 \cdot 10^{-3})v^2 C + \\ &+ (2,3 \cdot 10^{-5})v^3 C + (-8,84 \cdot 10^{-8})v^4 C + \\ &+ (-9,87 \cdot 10^{-15})v^5 C, \end{aligned} \quad (12)$$

Как следует из табл. 3, доверительный интервал по  $t$ -критерию Стьюдента составил 4,58% для уравнения регрессии 2-ой степени, а для уравнения регрессии шестого порядка – 1,3%.

На рис. 4 показаны зависимости, построенные по уравнениям (11) - (12).

Как следует из табл. 2 и рис. 4 уравнение регрессии 6-го порядка является наиболее корректным по отношению к массиву исходных данных.

Исследование зависимости проводилось на основе уравнения регрессии 6-го порядка (12). На рис. 5 приведен график зависимости (12) для  $C = 28$  А·ч.

Таблица 3 – Ошибки математической модели

Степень уравнения регрессии	2	3	4	6
Доверительный интервал по t-критерию Стьюдента, %	4,58	1,5	1,41	1,3

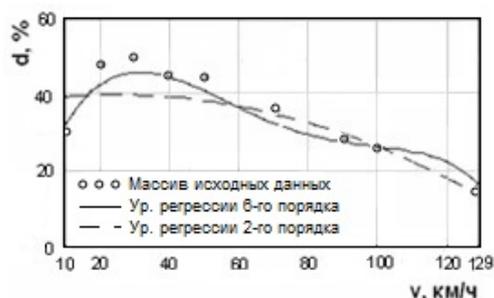


Рисунок 4 – Зависимость дальности пробега ( $d$ ) от скорости ( $v$ ) для емкости АКБ  $C = 28$  А·ч, построенная согласно уравнений (11) - (12)

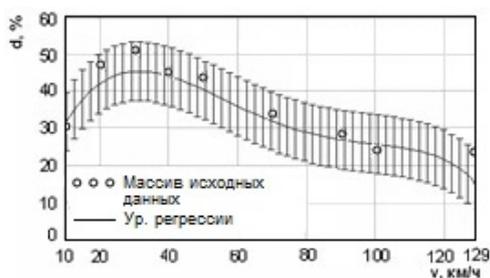


Рисунок 5 – Зависимость дальности пробега ( $d$ ) от скорости ( $v$ ) для емкости АКБ  $C = 28$  А·ч, построенная согласно уравнению регрессии 6-го порядка

Далее методом градиентного спуска определяются оптимальные значения емкости  $C$  и скорости  $v$ . Алгоритм данного метода состоит из нескольких этапов и описан в работе [11].

На рис. 6 изображена проекция целевой функции (уравнение регрессии (12)) на плоскость  $C$ - $v$ . Из приведенных графиков следует, что оптимальное значение параметров  $C$  и  $v$  по критерию максимума параметра  $d$  составляют 55 А·ч и 30 км/ч соответственно. Далее были построены траектории поиска точки с оптимальными координатами, которые показаны на рис. 7-9.

Чрезмерное увеличение батареи уменьшает грузоподъемность ЭМ и увеличивает стоимость перевозки полного тонно-километра. Наоборот, чрезмерное уменьшение батареи (следовательно, и пробега) сравнительно немного снижает стоимость перевозки полного тонно-километра. При этом батарея подвергается усиленному разряду, так как прежняя сила тока (определяемая условиями дороги и движения) дается теперь батарее меньшей емкости. Отсюда следует, что чрезмерное снижение массы батареи также нецелесообразно.

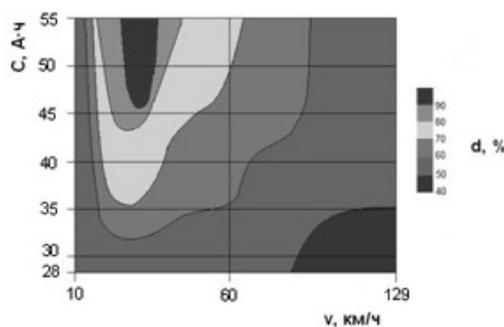


Рисунок 6 – Проекция траектории поиска оптимальной точки на плоскость  $C$ - $v$

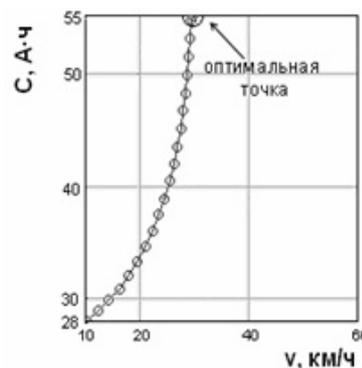


Рисунок 7 – Зависимость емкости АКБ ( $C$ ) от скорости ( $v$ )

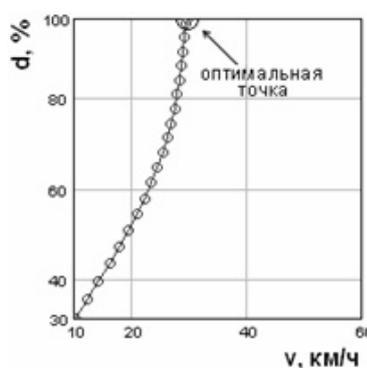


Рисунок 8 – Зависимость дальности пробега ( $d$ ) от скорости ( $v$ )

В случае применения частичной подзарядки или смены батареи для удешевления стоимости полезного тонно-километра при неизменном пробеге следует учитывать, что батарея будет разряжаться более интенсивно, и следует проверить, способна ли батарея без вреда переносить этот усиленный разрядный режим. В случае смены батареи нужно считаться с тем, что зарядка сменяемых батарей потребует дополнительных расходов на персонал зарядных станций.

**Выводы.** Поиск оптимальных значений скорости движения ЭМ с комбинированными режимами энергопитания и емкости АКБ по критерию максимума дальности пробега согласно метода градиентного спуска дал оптимальные значения скорости движения ЭМ и емкости АКБ, равные 30 км/ч, и 55 А·ч соответственно.

