

# Анализ влияния параметров приводного асинхронного двигателя на энергоэффективность электромобиля

ТАРАСЕНКО Д.А.

Методом планирования эксперимента проведен анализ влияния параметров асинхронного двигателя для привода ведущего колеса транспортного средства в городском цикле движения на энергоэффективность электромобиля.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, параметры, энергия, транспортное средство, цикл движения

Наиболее перспективными для привода транспортных средств являются синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ), вентильно-индукторные машины (ВИМ) и асинхронные машины (АМ). СМПМ обладают наилучшей удельной мощностью и моментом, что оптимально для встраивания двигателя непосредственно в колесо. Однако наличие дорогостоящих постоянных магнитов и необходимость датчика положения ротора снижают конкурентоспособность СМПМ. Основными недостатками ВИМ являются сильные вибрации и высокий уровень акустических шумов, что является следствием непостоянства мгновенного значения момента.

Для привода ведущих колёс транспортных средств традиционно применяются технологичные и надежные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, питаемые от преобразователей напряжения и частоты. Наилучшие качества управляемости и устойчивости транспортных средств достигаются при приводе каждого ведущего колеса от отдельного двигателя. Привод колёс обычно осуществляется через механический редуктор.

**Основные уравнения.** Уравнение прямолинейного движения транспортного средства с двумя ведущими приводными колёсами имеет вид [1]:

$$M = \frac{m_{TC}}{2} g R_K \sin \alpha + \frac{m_{TC}}{2} \frac{dV}{dt} R_K + M_T, \quad (1)$$

где  $M$  – вращающий момент каждого ведущего колеса;  $M_T$  – момент трения, определяющийся трением в опорах и сопротивлением воздуха;  $g$  – ускорение свободного падения;  $m_{TC}$  – масса автономного объекта;  $V$  – линейная скорость;  $R_K$  – радиус качения колеса.

Линейная скорость колёс  $V$  связана с соответствующей угловой скоростью  $W$  электродвигателя:

The effect the parameters of an induction motor for a vehicle's driving wheel have on the electric vehicle's energy efficiency in the urban mode of its motion is analyzed using the experiment planning method.

Key words: induction motor, parameters, energy, transport vehicle, motion mode

$$V = WR_K / I_{ред}, \quad (2)$$

где  $I_{ред}$  – передаточное отношение редуктора.

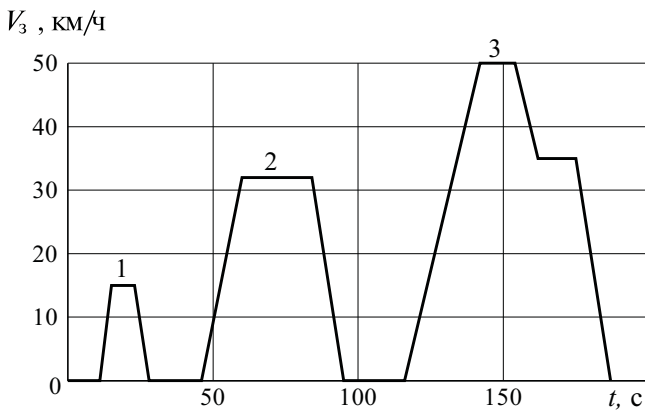
С учетом передаточного отношения редуктора вращающий момент колеса, приводимого во вращение асинхронным двигателем [1], определяется формулой

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r_2}{s} I_{ред}}{2 p f_1 \left( r_1 + c_1 \frac{r_2}{s} \right)^2 + (x_1 q + c_1 x_2 q)^2}, \quad (3)$$

где  $m_1$  – число фаз приводного асинхронного электродвигателя;  $p$  – число пар полюсов;  $U_1$  – напряжение;  $s$  – скольжение ротора относительно поля статора;  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_m$  – параметры Т-образной схемы замещения (индуктивные сопротивления рассчитаны при частоте  $f_1 = 50$  Гц);  $c_1$  – коэффициент приведения параметров Т-образной схемы замещения к Г-образной;  $q = f_1 / 50$  – относительная частота напряжения.

При заданном законе изменения скорости от времени  $V_3 = f(t)$ , решая совместно уравнения (1)–(3), можно определить скорость и момент приводных двигателей, а также напряжение  $U_1$  и частоту  $f_1$ . При скорости изменения частоты вращения ротора, на порядок меньшей скорости электромагнитных процессов при широтно-импульсном регулировании напряжения, рабочий режим асинхронной машины рассматривается как квазистатический. Предлагается использовать способ регулирования частоты вращения асинхронной машины по закону  $U_1 / f_1 = \text{const}$ . Алгоритм расчета характеристик движения транспортного средства по прямолинейной траектории приведён в [1], по криволинейной в – [2].

Расчет потребляемой энергии транспортного средства проведён на примере *городского цикла движения*. Для оценки экономичности автотранспортных средств в городском цикле движения применяется стандартный цикл ЕСЕ 15 [3, 4] (см. рисунок), состоящий из трех подциклов. Этот цикл применён для исследования влияния параметров приводного электродвигателя на энергоэффективность электромобиля. Подробно рассмотрено движение по горизонтальной прямолинейной трассе электроприводного транспортного средства массой 500 кг, приводимого в движение двумя приводными асинхронными двигателями номинальной мощностью  $P_2 = 15$  кВт, масса каждого ведущего колеса составляет 8 кг, радиус качения  $R = 0,34$  м. Рассмотрены два варианта двигателей: с числом пар полюсов  $p = 1$  и 2, передаточное отношение редуктора для  $p = 1$   $I_{ред} = 8$ , для  $p = 2$   $I_{ред} = 4$ .



Городской цикл движения транспортного средства

Параметры Т-образной схемы замещения  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $(z_z)$  приведены в табл. 1. Индуктивные сопротивления рассчитаны при частоте 50 Гц.

Работа алгоритма решения дифференциальных уравнений для низких значений скорости движения транспортного средства (обычно  $V_{min}$  менее 1,5 м/с) становится неустойчивой. Вследствие этого результат энергетического расчета для участка  $[V_{min}, 0]$  оказывается недостоверным. Из-за малости энергии этот участок не оказывает существенного влияния на общее энергопотребление, однако результаты в диапазоне  $V \in [V_{min}, 0]$  были исключены из рассмотрения [1]. Следует отметить, что практически все электроприводные транспортные сред-

ства при малых скоростях затормаживаются механическими устройствами.

**Исследование влияния параметров** приводного асинхронного двигателя на энергоэффективность транспортного средства проводилось методом планирования эксперимента с использованием алгоритма полного факторного математического эксперимента (ПФМЭ). Базовые уровни и шаги варьирования независимых переменных приведены в табл. 1.

Предварительные расчеты показали, что уменьшить потребляемую энергию можно увеличив  $x_m$ , что для тягового двигателя невозможно вследствие большого воздушного зазора между статором и ротором. Поэтому значение  $x_m$  не варьировалось, а изменялись параметры, не входящие в намагничивающий контур. Исследование проводилось в квазистатическом режиме при шаге по времени  $\Delta t = 0,08$  с при погрешности определения скорости  $\epsilon \leq 0,1\%$  [1]. Потребляемая энергия  $W$  для каждого подцикла (с учетом рекуперации) находилась при минимальной скорости устойчивой работы алгоритма  $V_{min}$ . Удобно кодировать номер численного опыта (от нуля до пятнадцати) в двоичной системе и в соответствии с этим выбирать сочетания факторов. Например, в восьмом опыте при  $p = 1$   $8_{10} = 1000_2$ , нормированные значения переменных равны  $X_1 = +1$ ;  $X_2 = -1$ ;  $X_3 = -1$ ;  $X_4 = -1$ , где  $X_i = (z_i - z_0) / D_0$  (табл. 2). Это означает, что  $r_1 = 0,419$  Ом;  $x_1 = 0,393$  Ом;  $r_2 = 0,104$  Ом;  $x_2 = 0,418$  Ом. В качестве примера в табл. 2 приведены потребляемая энергия и минимальная скорость устойчивой работы алгоритма для  $2p = 2$  (аналогичная таблица для  $2p = 4$  приведена в [1]).

**Анализ результатов.** По результатам ПФМЭ получены полиномы, приведенные в табл. 3. Погрешность пренебрежения неучтенными слагаемыми в формулах табл. 3 не превышает 5,9%.

С увеличением  $r_2$  потери в роторе в двигательном режиме увеличиваются, что приводит к увеличению потребляемой энергии. При этом рекуперативное торможение становится более эффективным за счет расширения области скольжений от критического скольжения до нуля в генераторном режиме и рекуперированная энергия также увеличивается. Оба эти фактора приводят к уменьшению

Таблица 1

Число пар полюсов	Значение независимых переменных (базовый уровень $z_0$ ) и шаг варьирования $D_0$ , Ом							
	$r_1$	$D_0$	$r_2$	$D_0$	$x_1$	$D_0$	$x_2$	$D_0$
$p = 1$	0,349	0,07	0,472	0,09	0,125	0,025	0,501	0,10
$p = 2$	0,355	0,07	0,673	0,14	0,186	0,04	0,912	0,18

Таблица 2

Номер п/п	Потребляемая энергия $W$ (кДж) и минимальная скорость устойчивой работы алгоритма $V_{\min}$ (м/с) для подцикла движения						Суммарная потребляемая мощность $SW$ , кДж
	1		2		3		
	$W$	$V_{\min}$	$W$	$V_{\min}$	$W$	$V_{\min}$	
0	6,0	0	29,5	0,7	77,6	0,6	113,1
1	5,3	0,8	30,4	0,8	77,2	0,6	112,9
2	5,1	0,7	29,7	0,7	77,9	0,6	112,7
3	5,0	0,8	30,0	0,8	78,0	0,7	113,0
4	5,5	0,8	32,2	0,9	79,9	0,8	117,6
5	5,7	1,0	32,3	1,0	82,2	0,9	120,3
6	5,2	0,9	31,1	0,9	80,4	0,8	116,8
7	5,2	1,0	30,8	0,9	80,7	0,9	116,7
8	5,5	0,6	30,4	0,6	78,4	0,5	114,2
9	5,9	0,7	30,6	0,7	78,2	0,6	114,6
10	5,7	0,7	30,4	0,6	79,0	0,6	115,1
11	5,4	0,6	31,0	0,7	80,5	0,6	117,0
12	5,9	0,8	31,7	0,8	81,1	0,7	118,7
13	5,9	0,9	31,4	0,8	80,2	0,7	117,5
14	5,5	0,8	30,8	0,8	79,6	0,7	115,9
15	5,6	0,9	31,5	0,9	80,9	0,8	117,9

Таблица 3

Число пар полюсов	Полиномиальные зависимости для потребляемой энергии $SW$ , кДж	Интервал варьирования (Ом)			
		$r_1$	$x_1$	$r\phi$	$x\phi$
$p = 1$	$\approx 106,05 + 5,44r_1 + 18,10x_1 - 12,92r\phi + 3,68x\phi$	[0,279, 0,419]	[0,382, 0,562]	[0,100, 0,150]	[0,401, 0,601]
$p = 2$	$\approx 76,01 + 5,27r_1 + 3,26x_1 - 27,03r\phi + 3,58x\phi$	[0,285, 0,425]	[0,533, 0,813]	[0,146, 0,226]	[0,732, 1,092]

суммарной потребляемой энергии за цикл движения.

**Вывод.** Для уменьшения энергии, потребляемой транспортным средством в цикле ЕСЕ 15, необходимо так оптимизировать параметры приводной асинхронной машины, чтобы эквивалентное сопротивление схемы замещения в наиболее длительном режиме работы уменьшилось. При этом небольшое увеличение сопротивления  $r\phi$  приводит к увеличению эффективности торможения и увеличению рекуперированной энергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геча В.Я., Захаренко А.Б., Тарасенко Д.А. Исследование влияния параметров приводного асинхронного двигателя на

энергоэффективность подвижного автономного объекта. — М.: Труды НПП ВНИИЭМ «Вопросы электромеханики», 2012, № 2.

2. Геча В.Я., Захаренко А.Б., Тарасенко Д.А. Математическая модель системы приводных асинхронных двигателей ведущих колёс транспортного средства. — Электричество, 2012, № 5.

3. Колобов М.Г., Климов В.И., Дубинин А.В., Москалёв М.В. Гибридный накопитель энергии для транспорта. — Электричество, 2011, № 10.

4. ГОСТ 20306–90. Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. — М.: Госстандарт.

Автор: Тарасенко Дмитрий Александрович в 2010 г. окончил Институт электротехники «НИУ «МЭИ». Аспирант кафедры «Электромеханика» «НИУ «МЭИ».