

УДК 621.313.13

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДВИЖНОГО АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА

В.Я. Геча, А.Б. Захаренко
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)
Д.А. Тарасенко
(ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»)

Приведены основные уравнения для расчёта характеристик режима прямолинейного движения автономного объекта (АО). Выполнен анализ влияния параметров асинхронного двигателя для привода ведущего колеса автономного объекта при заданном цикле движения на энергоэффективность АО на примере электромобиля.
Ключевые слова: городской цикл движения транспортного средства, асинхронный двигатель, потребляемая и рекуперированная энергия, параметры.

Существуют автономные объекты (АО), движущиеся по известному (в ряде случаев заданному) циклу – зависимости скорости от времени. К ним можно отнести перегрузочную машину [1] для энергоблоков АЭС, а также городской автомобиль с электроприводом [2]. В обоих случаях для привода ведущих колёс (ведущей оси) часто используются технологичные и надёжные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, питаемые от преобразователей напряжения и частоты. Привод колёс (оси) осуществляется через редуктор.

Целью работы является анализ влияния параметров приводного двигателя на энергоэффективность АО при заданном цикле движения.

Основные уравнения. Уравнение прямолинейного движения автономного объекта имеет вид:

$$m_{т.с} \frac{dV}{dt} = \frac{\sum M}{R_k} - \sum F_c, \quad (1)$$

где $m_{т.с}$ – масса автономного объекта (транспортного средства); V – линейная скорость колёс АО; $\sum M$ – суммарный момент приводных двигателей; $\sum F_c$ – сумма сил сопротивления и инерции, действующих на АО; R_k – радиус качения колеса.

Линейная скорость колёс V связана с соответствующей угловой скоростью Ω электродвигателя:

$$V = \Omega R_k / I_{ред}, \quad (2)$$

где $I_{ред}$ – передаточное отношение редуктора. С учётом передаточного отношения редуктора вращаю-

щий момент колеса, приводимого во вращения асинхронным двигателем [3], определяется формулой:

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

где m_1 – число фаз приводного асинхронного двигателя; 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, причём индуктивные сопротивления рассчитаны при частоте $f_1 = 50$ Гц; c_1 – коэффициент приведения параметров Т-образной схемы замещения к Г-образной; $\theta = \frac{f_1}{50}$ – относительная частота напряжения.

Для подвижного автономного объекта с двумя ведущими приводными колёсами из формулы (1) следует, что вращающий момент каждого ведущего колеса

$$M = \frac{m_{т.с}}{2} g R_k \sin \alpha + \frac{m_{т.с}}{2} \frac{dV}{dt} R_k + M_{т}, \quad (4)$$

где $M_{т}$ – момент трения, определяющийся трением в опорах и сопротивлением воздуха; g – ускорение свободного падения.

При скорости изменения частоты вращения ротора на порядок меньшей скорости электромагнитных процессов при широтно-импульсном регулировании напряжения рабочий режим асинхронной машины рассмотрен как квазистатический. Предлагается использовать способ регулирования частоты вращения асинхронной машины

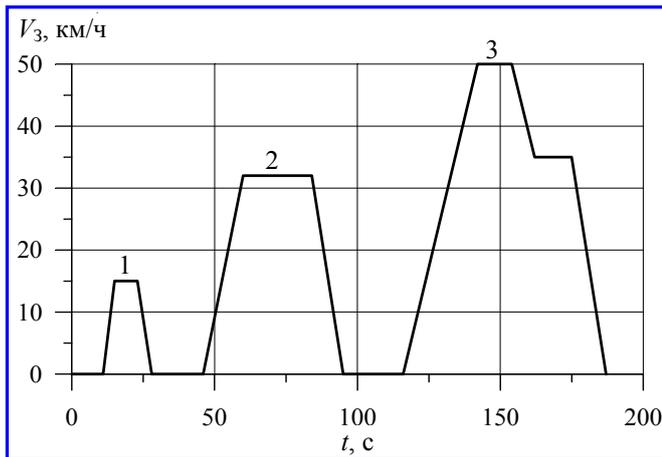


Рис. 1. Схема городского цикла движения транспортного средства

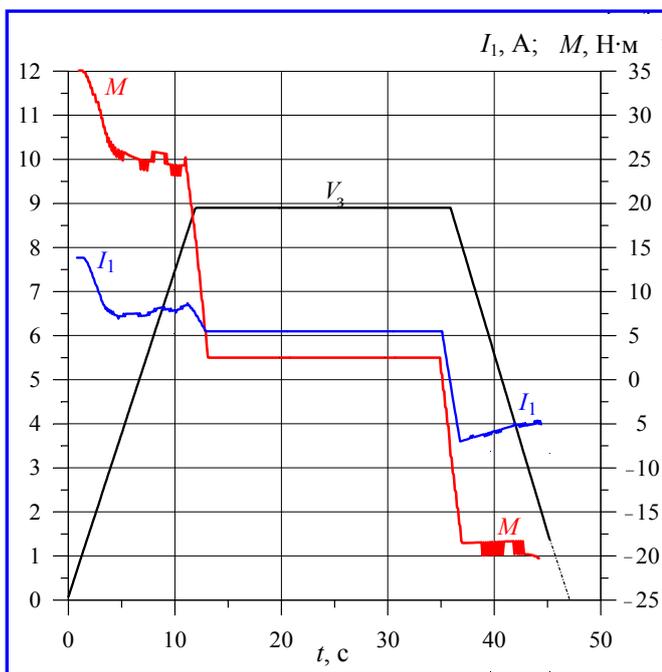


Рис. 2. Зависимость заданной линейной скорости колеса V_3 , момента приводного двигателя M и тока приводного двигателя I_1 от времени t

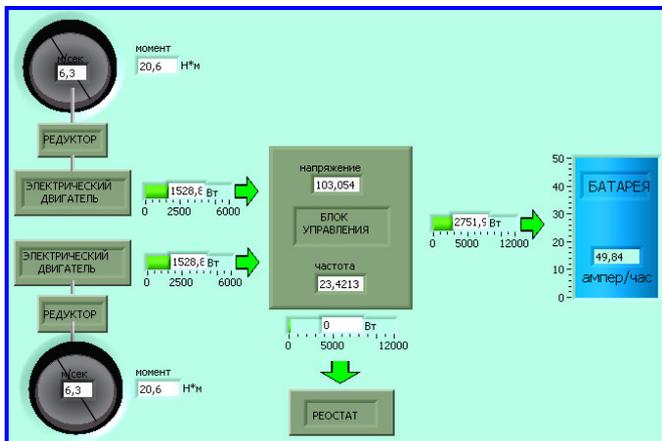


Рис. 3. Визуализация расчета режима рекуперации энергии при торможении транспортного средства

по закону $U_1/f_1 = \text{const}$. При заданном законе изменения скорости от времени $V_3 = f(t)$, решая совместно уравнения (2) – (4), можно определить характеристики управления скоростью и моментом приводного двигателя – напряжение U_1 и частоту f_1 . При этом используется один из стандартных методов решения дифференциального уравнения, реализованный в программе LabVIEW [4], например, Рунге-Кутта или Эйлера. Далее производится определение тока ротора, активной составляющей тока статора, потребляемой из накопительной батареи (или отдаваемой в батарею) активной электрической мощности, потребляемой из батареи (или отдаваемой) энергии, мощности на валу, КПД. Алгоритм расчёта характеристик режима движения транспортного средства по криволинейной траектории приведён в [5]. Режим прямолинейного движения автономного объекта, рассмотренный в данной статье, является частным случаем криволинейного. В качестве примера АО рассмотрим электроприводное транспортное средство.

Анализ потребляемой энергии транспортного средства на примере городского цикла движения. Для оценки экономичности автотранспортных средств, в том числе электроприводных, полной массой до 3,5 т в городском цикле движения применяется стандартный цикл ЕСЕ 15 [2, 6]. Цикл состоит из трёх подциклов, обозначенных на рис. 1. Этот цикл применён для исследования влияния параметров приводного электродвигателя на энергоэффективность электромобиля.

На рис. 2 подробно рассмотрен подцикл 2 движения по горизонтальной прямолинейной трассе электроприводного транспортного средства массой 500 кг, приводимого в движение двумя приводными асинхронными двигателями номинальной мощностью $P_2 = 15$ кВт с числом пар полюсов $p = 2$. Параметры Т-образной схемы замещения r_1, x_1, r_2', x_2' , приведены в таблице в строке «Базовый уровень», $x_m = 27,1$ Ом. Масса каждого ведущего колеса составляет 8 кг, радиус качения $R = 0,34$ м, передаточное отношение редуктора $I_{ред} = 4$. Индуктивные сопротивления рассчитаны при частоте 50 Гц.

Для наглядной иллюстрации работы алгоритма решения дифференциальных уравнений для нахождения алгоритма управления ведущими колёсами был выбран «крупный» шаг по времени $\Delta t = 0,1$ с и большая допустимая погрешность определения скорости $\epsilon \leq 0,5\%$. Этим определяются показанные на графике пульсации тока и момента. При более «мелком» шаге Δt , меньшей допустимой погреш-

ности ε пульсации тока и момента значительно уменьшаются.

При равноускоренном движении происходило уменьшение тока статора от $I_1 = 13,8$ до $5,4$ А и вращающего момента $M = 35,1$ до $2,5$ Н·м. За первые 35 с потреблённая из накопительной батареи приводными асинхронными двигателями энергия составила 47,1 кДж.

В результате рекуперации энергии в аккумуляторную батарею при «электрическом» торможении за время $t = 35 \div 45,2$ с потреблённая энергия уменьшилась до 25,2 кДж. Возможность рекуперации энергии при торможении существенно улучшает энергоэффективность транспортного средства. Пример расчёта точки при $t = 39$ с в режиме рекуперации энергии приведён на рис. 3.

При равнозамедленном движении транспортного средства со скоростью менее $V_{\min} = 1,4$ м/с «электрическое» торможение стало неэффективным в результате неустойчивой работы алгоритма решения дифференциальных уравнений при малых значениях скорости. 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. Следует отметить, что на практике при малых скоростях все электроприводные транспортные средства затормаживаются механическими устройствами торможения.

Полый факторный эксперимент. Исследование влияния параметров приводного асинхронного двигателя на энергоэффективность транспортных средств проводилось методом планирования эксперимента с использованием алгоритма полного факторного математического эксперимента (ПФМЭ). Предварительные расчёты показали, что уменьшить потребляемую энергию можно увеличив x_m , что для тягового двигателя не представляется возможным вследствие большого воздушного зазора между статором и ротором. В связи с этим x_m не варьировалось, а изменялись параметры, не входящие в намагничивающий контур с шагами варьирования, $\Delta r_1 = 0,07$ Ом, $\Delta x_1 = 0,14$ Ом, $\Delta r_2' = 0,04$ Ом, $\Delta x_2' = 0,18$ Ом. Исследование проводилось в квазистатическом режиме при шаге по времени $\Delta t = 0,08$ с при погрешности определения скорости $\varepsilon \leq 0,1\%$. Потребляемая энергия W для каждого подцикла (с учётом рекуперации) находилась при минимальной скорости устойчивой работы алгоритма V_{\min} . Данные при неустойчивой работе были исключе-

ны из рассмотрения, остальные результаты приведены в таблице.

Анализ результатов. Общее время цикла (см. рис. 1) составило 187 с, из них время работы в подциклах – 135 с. Максимальное суммарное время неустойчивой работы алгоритма составило 5,2 с, т. е. 3,8% от времени работы в подциклах (см. таблицу). Таким образом, потребляемая энергия определена с погрешностью не хуже 3,8%. Среднее значение потребляемой энергии для каждого подцикла при варьировании параметров (последняя строка таблицы) соответствует энергии, рассчитанной для базового уровня параметров с погрешностью не хуже 1%, это свидетельствует об адекватности полученных результатов.

Тривиальный результат ПФМЭ заключается в том, что для максимального уменьшения потребляемой энергии и для увеличения рекуперированной энергии необходимо уменьшить параметры схемы замещения r_1, x_1, r_2', x_2' относительно базового уровня (строка 0 таблицы). Этот результат также свидетельствует об адекватности расчётной модели.

По результатам таблицы получен полином

$$\Sigma W \approx 76,01 + 5,27r_1 + 3,26x_1 - 27,03r_2' + 3,58x_2', \quad (5)$$

при $r_1 \in [0,285, 0,425]$ Ом, $x_1 \in [0,533, 0,813]$ Ом, $r_2' \in [0,146, 0,226]$ Ом, $x_2' \in [0,732, 1,092]$ Ом. Погрешность пренебрежения неучтёнными слагаемыми в формуле (5) не превышает 5,5%. Большая величина коэффициента при r_2' обусловлена малыми абсолютными значениями этой величины в рассмотренном примере. Небольшое (до 20%) увеличение r_2' при уменьшении остальных параметров приводит к увеличению вращающего момента и, в конечном итоге, приводит к снижению потребляемой энергии.

Для уменьшения потребляемой энергии на 2% от базового уровня необходимо уменьшить r_1 и x_2' примерно на 20%, а x_1 и r_2' допускается увеличить на 20% (строка 6 таблицы). Наиболее существенно влияет на потребляемую энергию подцикл 3. Наиболее длительно в нём приводные двигатели работают при $U_1 = 229$ В и $f_1 = 52$ Гц, а также при $U_1 = 160$ В и $f_1 = 36$ Гц. При изменении параметров, указанном в строке 6, эквивалентное сопротивление схемы замещения уменьшается при обоих упомянутых частотах, что приводит к снижению потребляемой энергии.

Потребляемая энергия W и минимальная скорость устойчивой работы алгоритма V_{\min}

№	Варьируемые параметры				Результаты для подцикла движения						ΣW , кДж
					1		2		3		
	r_1 , Ом	x_1 , Ом	r_2' , Ом	x_2' , Ом	W , кДж	V_{\min} , м/с	W , кДж	V_{\min} , м/с	W , кДж	V_{\min} , м/с	
Базовый уровень	0,355	0,673	0,186	0,912	6,3	1,4	25,2	1,4	46,8	1,3	78,3
0	0,285	0,533	0,146	0,732	5,9	1,2	24,2	1,1	44,1	1,1	74,2
1	0,285	0,533	0,146	1,092	6,6	1,5	28,4	1,5	48,8	1,5	83,8
2	0,285	0,533	0,226	0,732	5,6	1,2	23,8	1,1	47,0	1,1	76,4
3	0,285	0,533	0,226	1,092	5,9	1,5	24,6	1,5	46,8	1,5	77,3
4	0,285	0,813	0,146	0,732	6,6	1,4	30,1	1,4	46,4	1,4	83,1
5	0,285	0,813	0,146	1,092	7,0	1,8	25,2	1,7	46,4	1,6	78,6
6	0,285	0,813	0,226	0,732	5,9	1,5	24,3	1,4	46,5	1,5	76,7
7	0,285	0,813	0,226	1,092	6,4	1,8	24,9	1,7	47,1	1,7	78,4
8	0,425	0,533	0,146	0,732	6,5	1,0	24,6	1,0	49,1	1,0	80,2
9	0,425	0,533	0,146	1,092	6,8	1,4	25,7	1,3	48,0	1,3	80,5
10	0,425	0,533	0,226	0,732	5,8	1,1	24,6	1,1	46,8	1,0	77,2
11	0,425	0,533	0,226	1,092	6,0	1,4	25,3	1,4	46,9	1,3	78,2
12	0,425	0,813	0,146	0,732	6,6	1,3	24,8	1,3	49,2	1,3	80,6
13	0,425	0,813	0,146	1,092	7,2	1,6	24,9	1,6	47,0	1,5	79,1
14	0,425	0,813	0,226	0,732	6,3	1,4	24,7	1,3	46,9	1,3	77,9
15	0,425	0,813	0,226	1,092	6,6	1,6	25,5	1,7	48,6	1,7	80,7
Среднее значение					6,3		25,3		47,2		78,9

Допустимость увеличения r_2' позволяет предъявить менее жёсткие требования к содержанию примесей в алюминии для заливки беличьей клетки ротора. Возможность увеличения x_1 позволит проектировать машину с более надёжным креплением лобовых частей у сердечника статора. Эти меры в целом приведут к удешевлению асинхронной машины и увеличению её надёжности.

Выводы

1. Для автономных объектов, движущихся по заранее известному циклу, возможна минимизация потребляемой энергии путём варьирования параметров приводного двигателя.

2. 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. Например необходимо уменьшить r_1 и x_2' на 20%, при этом допускается увеличить одновременно x_1 и r_2' на 20%. Возможность варьирования

параметров в ряде случаев приводит к удешевлению машины и увеличению её надёжности.

Литература

1. Расчётные и экспериментальные исследования неравномерности движения моста машины перегрузочной / А. Н. Аронзон, В. Я. Геча, М. А. Смирнитский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : НПП ВНИИЭМ, 2004 – Т. 101. – С. 254 – 264.
2. Гибридный накопитель энергии для транспорта / М. Г. Колобов, В. И. Климов, А. В. Дубинин [и др.] // Электричество. – М. : РАН, 2012. – С. 26 – 30.
3. Проектирование электрических машин: учебник для вузов в двух томах / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин [и др.]; под ред. И. П. Копылова. – М. : Высшая школа, 2002. – 608 с.
4. Суранов А. Я. LabVIEW 8.2: справочник по функциям / А. Я. Суранов. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 536 с.
5. Математическая модель системы приводных асинхронных двигателей ведущих колёс транспортного средства / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, Д. А. Тарасенко // Электричество. – М. : РАН, 2012. – № 5. – С. 57 – 60.
6. ГОСТ 20306-90. Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. – Введ. 01.01.1992. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 34 с.

Поступила в редакцию 09.04.2012

*Владимир Яковлевич Геча, д-р техн. наук, главный конструктор по динамике, прочности и виброакустике космических аппаратов и электрооборудования, т. (495) 366-26-69.
 Андрей Борисович Захаренко, д-р техн. наук, заместитель начальника отдела, т. (495) 366-26-44.
 E-mail: vniiem@vniiem.ru.
 Дмитрий Александрович Тарасенко, аспирант, т. (495) 362-72-69.*