

УДК 378.001

**ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА
ОСНОВЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
TRACTION ELECTRIC DRIVE OF A VEHICLE BASED ON AN
ASYNCHRONOUS MOTOR**

Н.О. Савко

Научный руководитель – Сизиков С.В., к.т.н., доцент

sizikovsv@bntu.by

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

N.O. Sauko

Scientific adviser – Sizikov S.V., Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: В данной работе разработана система тягового электропривода для грузового электротранспорта магистрального типа. Для реализации системы тягового электропривода был разработан специализированный асинхронный электродвигатель, и система векторного управления

Ключевые слова: электромобиль, электропривод, эффективность, скорость, график.

Annotation: In this paper, a system of traction electric drive for electric freight transport of the main type has been developed. To implement the traction electric drive system, a specialized asynchronous electric motor was developed, and a vector control system

Key words: electric car, electric drive, efficiency, speed, schedule.

Введение

Электромобили (ЭМ) на сегодняшний день представляют собой один из наиболее перспективных путей развития автотранспорта, энергетической безопасности и сокращению выбросов загрязняющих веществ в городах. В долгосрочной перспективе электромобили важны для стран, стремящихся к уменьшению уровня выбросов углеводородов от наземного транспорта в городах.

Электромобиль в своём составе имеет систему тягового электропривода, который предназначен для приведения в движение транспортных средств (электровозов, электропоездов, тепловозов и теплоходов с электроприводом, трамваев, троллейбусов, электромобилей и т.п.).

Электротранспорт становится неотъемлемой частью современного мира, таким образом актуальность данной работы не вызывает сомнений.

Основная часть

Принципиальное отличие данного процесса регулирования скорости тяговых электродвигателей (второго характерного процесса в замкнутой системе) от процесса изменения параметров с целью формирования новой механической характеристики заключается в возможности получения различных значений скорости ЭД при постоянном значении величины момента

сопротивления. Воздействие водителя при этом является внешним воздействием.

За основу промышленной установки примем грузовик МАЗ-4371С0, для которого необходимо разработать тяговый электропривод, который заменит имеющийся ДВС.

На электромобили устанавливают литий-ионную батарею, которая состоит из нескольких модулей, соединенных между собой. Выдаваемый ток такой батареи составляет порядка 400-600 А постоянного тока, а ее емкость соответствует мощности электродвигателя.

Сила сопротивления движения в гору определяется по формуле:

$$F_{\pi} = mg \cdot \sin\alpha; \tag{1}$$

К электроприводу предъявляются следующие требования:

- время регулирования должно быть, как можно меньше;
- быстродействие ограничивается значением рывков;
- перерегулирование < 5%;
- количество пусков и торможений определяется из энергетических показателей электропривода;
- максимальная скорость $V_{max} = 90$ км/ч;
- минимальная скорость $V_{min} = 5$ км/ч;
- диапазон регулирования $D = 18$;
- ускорение $0,6$ м/с².

Расчёт механической части автоматизированного электропривода механизма. Для анализа механической части электропривода используется переход от реальной кинематической схемы к одномассовой.

Расчетная схема одномассовой системы приведена на рисунке 1:

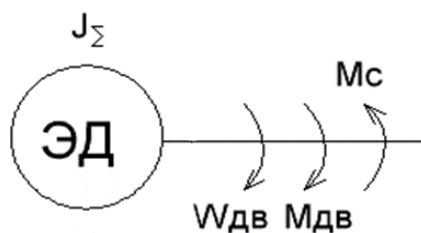


Рисунок 1 – Расчетная схема одномассовой системы электропривода

$$J_{\Sigma} = \delta \cdot J_{дв} + J_{мехпр}, \tag{3}$$

На данном этапе проектирования момент инерции ротора электродвигателя неизвестен.

Полная снаряжённая масса автомобиля (m_{π}): $m_{\pi} = 12000$ кг.

Максимальная скорость $V_{max} = 90$ км/ч = 25 м/с.

На каждой передаче электродвигатель выходит во вторую зону регулирования на скоростях от 314 до 840 рад/с.

Рассчитаем точные скорости автомобиля при переключении АКПП для второй зоны регулирования:

$$V_{авт} = \frac{\omega_{400-840} \cdot R_k}{i} = \frac{(400 - 840) \cdot 0,405}{15,25} = 10,68 - 24,5 \frac{м}{с},$$

Примем максимальную нагрузку необходимую для разгона до максимальной скорости с максимальной загрузкой на ровном участке дороги:

$$f = f_0(1 + (0,006 \cdot V_a)^2) = 0,007(1 + (0,006 \cdot 25)^2) = 0,0072,$$

$$F_k = mg \cdot f = 12000 \cdot 9,81 \cdot 0,0072 = 840 \text{ Н},$$

$$F_{св} = k_b \cdot S \cdot V^2 = 0,48 \cdot 7,7 \cdot 25^2 = 2310 \text{ Н},$$

$$m \cdot a = 12000 \cdot 2 = 24000 \text{ Н},$$

$$F_s = F_k + F_{св} \pm ma = 840 + 2310 + 24000 = 27150 \text{ Н}.$$

Время разгона:

$$t_{p1} = \frac{V_1}{a} = \frac{90 \cdot 1000}{0,6 \cdot 3600} = 41,6 \text{ с}.$$

Исходя из полученных данных, можно рассчитать мощность, необходимую для движения автомобиля при данных условиях.

$$P = F \cdot V_a = 3150 \cdot 25 = 78,750 \text{ Вт}.$$

Необходимо привести данные силы к моменту на колесе механизма:

$$M_s = F_s \cdot R_k = 27150 \cdot 0,405 = 10995,75 \text{ Н},$$

$$M = F \cdot R_k = 3150 \cdot 0,405 = 1275,75 \text{ Н}.$$

Скоростная характеристика механизма представлена на рисунке 2:



Рисунок 2 – Расчетная скоростная характеристика механизма

Параметрами электрических машин называются активные и индуктивные сопротивления Т-образной электрической схемы замещения (рисунок. 3).

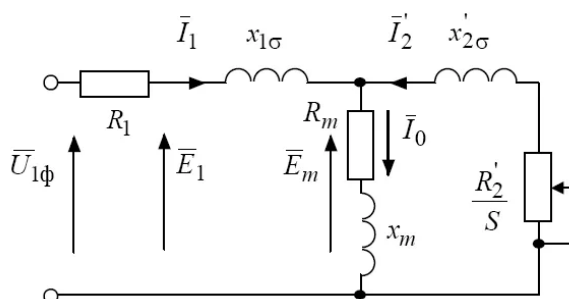


Рисунок 3 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Параметры асинхронного двигателя можно считать постоянными неизменными.

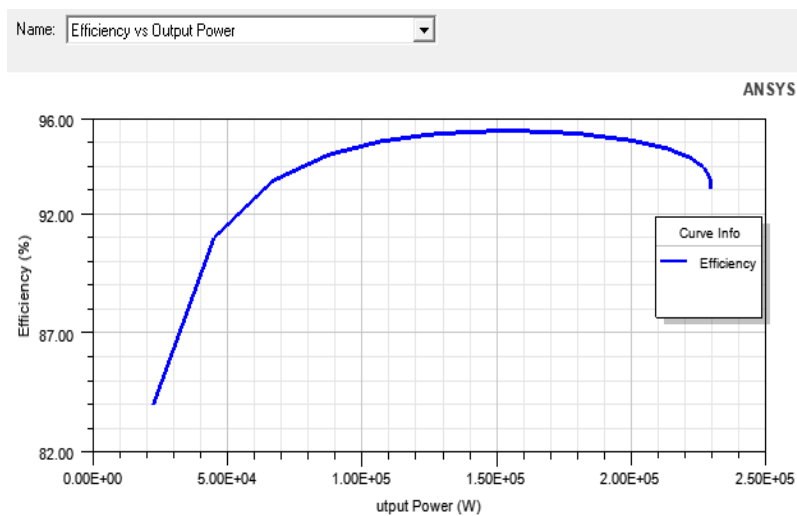


Рисунок 4 – Зависимость КПД асинхронного двигателя от его мощности

Исходя из полученных результатов, можно судить о то, что КПД двигателя достигает максимально 95%, cosφ асинхронного двигателя составляет 87%. Двигатель в состоянии работать в диапазоне частот вращения до 9000 об/мин, в режиме постоянства мощности, и имеет небольшой запас по моменту на всём диапазоне частот вращения.

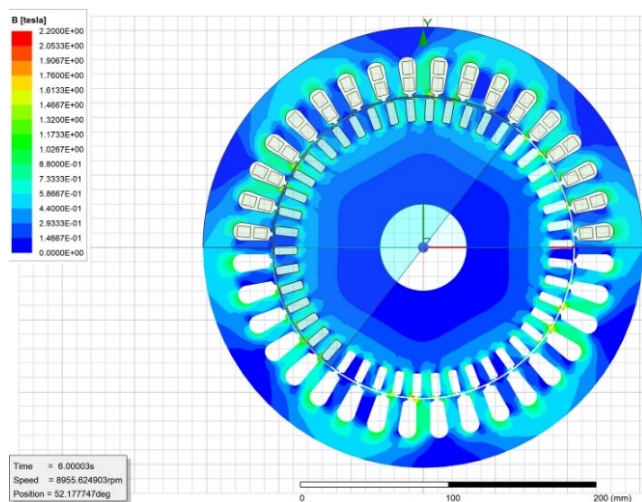


Рисунок 6 – Значение магнитной индукции асинхронного двигателя для скорости 9000 об/мин при номинальной нагрузке

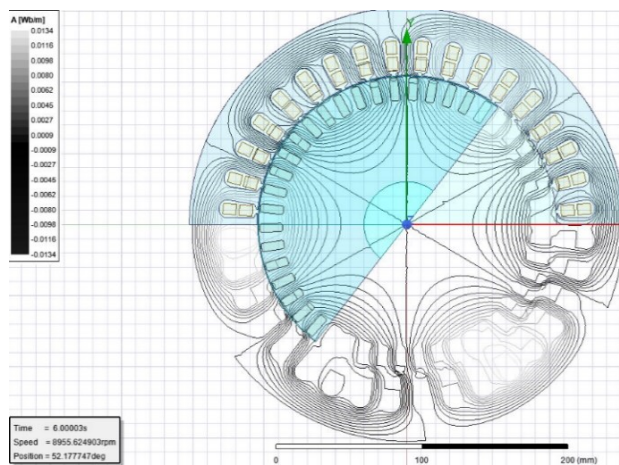


Рисунок 7 – Значение магнитного потока, электрической машины при скорости 9000 об/мин при номинальной нагрузке

По полученным результатам расчёта асинхронного двигателя заполним таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры схемы замещения АД

$R_1, \text{ Ом}$	$X_1, \text{ Ом}$	$R_2', \text{ Ом}$	$X_2', \text{ Ом}$	$X_\mu, \text{ Ом}$	$L_{1\sigma}, \text{ Гн}$	$L_{2\sigma}, \text{ Гн}$	$L_m, \text{ Гн}$
0.012	0.0857	0.0064	0.0779	1.43	0.0001	0.0001	0.0015

Дифференциальные уравнения, описывающие электромеханическое преобразование энергии в асинхронном короткозамкнутом двигателе при описании во вращающейся системе координат ХУ будут иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1x} = R_1 i_{1x} + \frac{L_{12}}{L_2} \frac{d\Psi_2}{dt} + \left(L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} \right) \left(\frac{di_{1x}}{dt} - i_{1y} \omega_0 \right), \\ u_{1y} = R_1 i_{1y} + \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_2 \omega_0 + \left(L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_2} \right) \left(\frac{di_{1y}}{dt} - i_{1x} \omega_0 \right), \\ 0 = \frac{R_2'}{L_2} \Psi_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} - R_2' \frac{L_{12}}{L_2} i_{1x}, \\ 0 = R_2' \frac{L_{12}}{L_2} i_{1y} - \Psi_2 \omega_2, \\ M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_2 i_{1y}, \end{array} \right. \quad (5)$$

Представим третье и четвертое уравнения системы уравнений в виде:

$$p\Psi_2 = R_2' \frac{L_{12}}{L_2} i_{1x} - \frac{R_2'}{L_2} \Psi_2,$$

$$\Psi_2 \omega_0 = \Psi_2 \omega + R_2' \frac{L_{12}}{L_2} i_{1y}.$$

Передаточная функция звена, преобразующая проекцию тока статора i_{1x} в потокосцепление Ψ_2 , имеет вид:

$$W_r = \frac{\Psi_2}{i_{1x}} = \frac{L_{12}}{T_2 p + 1}.$$

Структурная схема объекта управления (АД и преобразователь напряжения) во вращающейся системе координат ХУ представлена на рис 8.

L_1 , L_2 , L_{12} – индуктивности статора, ротора и взаимной индукции соответственно:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0.00009 + 0.0015 = 0.0016 \text{ Гн},$$

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_m = 0.00008 + 0.0015 = 0.0016 \text{ Гн},$$

$$L_{12} = L_m = 0.0015 \text{ Гн}.$$

Электромагнитная постоянная времени цепи ротора:

$$T_2 = \frac{L_2}{R'_2} = \frac{0.0016}{0.0064} = 0.2513 \text{ с}.$$

Коэффициент магнитной связи ротора:

$$K_M = \frac{L_{12}}{L_2} = \frac{0.0015}{0.0016} = 0.9435.$$

Заданное значение потокосцепления ротора:

$$\psi_{2x} = \frac{1}{p_{\pi}} \sqrt{\frac{2M_{\text{НОМ}}R'_2}{3\omega_{\text{НОМ}}S_{\text{НОМ}}}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2 \cdot 384 \cdot 0.0064}{3 \cdot 314.16 \cdot 0.0057}} = 0.3198 \text{ Вб}.$$

Заданные значения токов i_{1x} и i_{1y} рассчитываются по выражениям:

$$i_{1x} = \frac{\psi_{2x}}{L_{12}} = \frac{0.3198}{0.0015} = 210.76 \text{ А},$$

$$i_{1x\text{max}} = 2i_{1x} = 2 \cdot 210.7582 = 421.52 \text{ А},$$

$$i_{1y\text{max}} = \frac{2M_{\text{max}}}{3p_{\pi}K_M\psi_{2x}} = \frac{2 \cdot 725}{3 \cdot 3 \cdot 0.9435 \cdot 0.3198} = 534.01 \text{ А}.$$

Постоянные времени цепи статора:

$$T_{1x} = \frac{L_{1\sigma}}{R_1} = \frac{0.00009}{0.012} = 0.0076 \text{ с},$$

$$T_{1y} = \frac{\sigma L_1}{R_1} = \frac{0.1099 \cdot 0.0016}{0.012} = 0.0147 \text{ с}.$$

Максимальные значения напряжений по осям x и y:

$$U_{1x\text{max}} = R_1 i_{1x\text{max}} - \omega_1 \sigma L_1 i_{1y\text{max}},$$

$$U_{1x\text{max}} = 0.012 \cdot 421.52 - 2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot 0.1099 \cdot 0.0016 \cdot 534.01 = -83.89 \text{ В},$$

$$U_{1y\text{max}} = R_1 i_{1y\text{max}} + \omega_1 (\psi_{2x} + L_{1\sigma} i_{1x\text{max}}),$$

$$U_{1y\text{max}} = 0.012 \cdot 534.01 + 2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot (0.3198 + 0.00009 \cdot 421.52) = 343.92 \text{ В}.$$

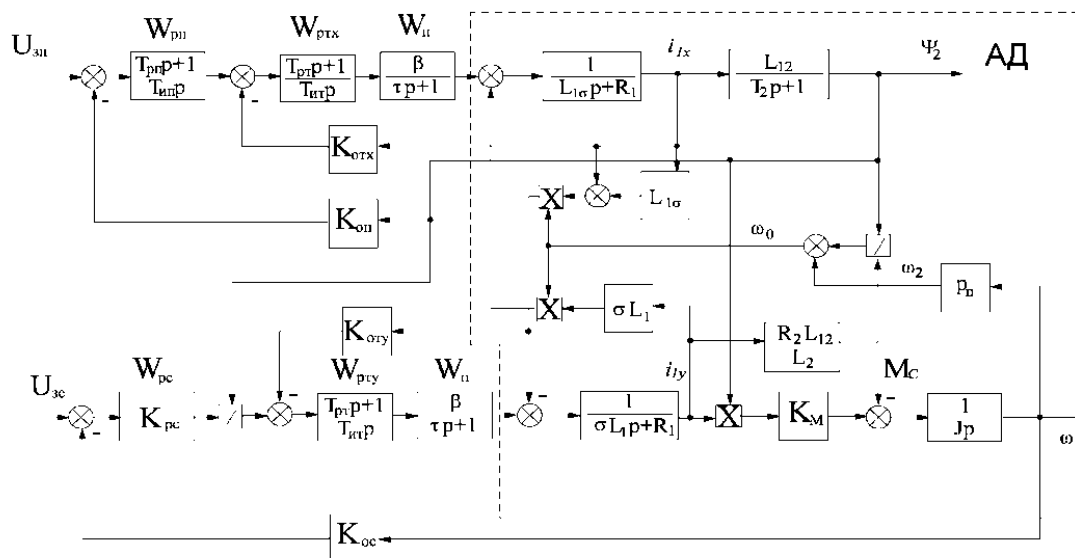


Рисунок 8 – Структурная схема АД и преобразователя напряжения

Заключение

Оптимальной системой решено выбрать асинхронный двигатель – преобразователь частоты, и спроектирована функциональная схема.

Расчёт и построение нагрузочных диаграмм показал, в качестве электродвигателя необходимо выбрать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором АИР280S8 $P_H = 50$ кВт, $n_{ном} = 740$ об/мин. После выбора была произведена предварительная проверка по нагреву.

В качестве преобразователя электрической энергии был выбран преобразователь частоты фирмы Brusa DMC524 $P_H = 60$ кВт, $I_{ном,пр} \geq 108$ А.

Компьютерная имитационная модель автоматизированного электропривода механизма в среде Matlab позволила промоделировать переходные процессы в системе и более точно определить оптимальные значения регуляторов. Рассчитаны зависимости задающего воздействия от времени. Построены статические характеристики электропривода и рассчитаны переходные процессы, определены показатели качества системы.

В связи с тем, что данная установка не имеет заземления, и должна соответствовать особым требованиям по электробезопасности, были рассмотрены вопросы охраны труда и описаны меры безопасности при эксплуатации аккумуляторных батарей.

Экономическое обоснование технических решений показало, что данная система не имеет высокого экономического преимущества, однако это может значительно изменить в ближайшем времени.

Литература

1. Фираго, Б.И. Теория электропривода: учебное пособие / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: ЗАО "Техноперспектива", 2004. – 527 с.
2. Фираго, Б.И. Расчёты по электроприводу производственных машин и механизмов / Б.И. Фираго. – Минск: ЗАО "Техноперспектива", 2012. – 639 с.
3. Фираго, Б.И. Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию по теории электропривода / Б.И. Фираго. – Минск, 2005.

4. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
5. Руктешель, О. С. Выбор параметров и оценка тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автомобиля: учебно-методическое пособие для студентов / О. С. Руктешель. – Минск: БНТУ, 2015. – 80 с.
6. Фролов, Ю.М.. Проектирование электропривода промышленных механизмов / Ю.М. Фролов. – М.: 2014. – 346 с.
7. Руктешель, О. С. Учебное пособие для студентов специальности «Автомобилестроение» по дисциплине "Конструкция автомобилей" / О.С. Руктешель. – Минск: БНТУ, 2000. – 68 с.
8. Петухов, С.В. Электропривод промышленных установок: учебное пособие / С.В. Петухов, М.В. Кришьянис. – Архангельск, 2015 – 300 с.