

УДК 621.333

ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОБУСА

CONSTRUCTION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE ELECTRIC BUS ASYNCHRONOUS MOTOR

Ю. Е. Атаманов, канд. техн. наук, доц., **В. Н. Плищ**, ст. преп.,
А. Д. Хилько

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь
Yu. Atamanov, PhD in Engineering, Associate Professor,
V. Plishch, Senior Lecturer, A. Khilko
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

Предложена методика построения механической характеристики асинхронного электродвигателя с векторной системой управления для электрического транспорта. Приведен пример расчета механической характеристики двухзвенного электробуса.

A technique for constructing the mechanical characteristics of an asynchronous electric motor with a vector control system for electric transport is proposed. An example of calculating the mechanical characteristics of a two-link electric bus is given.

Ключевые слова: механическая характеристика, двигатель асинхронный, управление, троллейбус.

Keywords: mechanical characteristics, asynchronous motor, control, trolleybus.

ВВЕДЕНИЕ

При определении динамического фактора и исследовании разгонных свойств электрического транспорта (ЭТ) необходимо знать механическую характеристику тягового электродвигателя (ТЭД). Достаточно подробно методика построения естественной и искусственных характеристик ТЭД рассмотрены профессором Б. И. Фираго [1, 2]. Однако методика позволяет строить механическую характеристику при фиксированных значениях частоты. При моделировании движения электробуса и построении динамической

характеристики необходимо знать непрерывную зависимость момента от частоты вращения во всем диапазоне регулирования скорости вращения ротора электродвигателя. В связи с этим предложена методика, позволяющая моделировать на этапе проектирования механическую характеристику (МХ) электродвигателя для решения задач по определению разгонных свойств ЭТ.

В настоящее время на ЭТ широкое распространение получили векторные системы управления ТЭД. Они предусматривают две зоны регулирования скорости:

- 1) диапазон постоянного момента $0 \leq \omega \leq \omega_{\text{ном}}$;
- 2) диапазон постоянной мощности $\omega_{\text{ном}} \leq \omega \leq \omega_{\text{мах}}$.

При векторном управлении МХ близки к линейным зависимостям и для их построения достаточно знать несколько точек.

В первом диапазоне регулирования данные точки можно определить следующим образом [2]:

$$M = 0; \quad \omega_0 = \frac{\omega_1}{p_n}; \quad (1)$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot K_r \cdot i_{1y} \cdot \Psi_{2m}; \quad \omega = \frac{\omega_{эл}}{p_n}, \quad (2)$$

где ω_0 – синхронная угловая скорость ротора, рад/с; ω_1 – угловая частота асинхронного электродвигателя (АД), рад/с; p_n – число пар полюсов; K_r – коэффициент магнитной связи ротора; i_{1y} – моментная составляющая вектора тока статора по оси y , А; Ψ_{2m} – амплитудное значение потокосцепления ротора, Вб; ω , $\omega_{эл}$ – механическая и электрическая угловые скорости ротора, рад/с.

Потокосцепление Ψ_{2m} принимается постоянной величиной и равной его номинальному значению $\Psi_{2m} = \Psi_{2\text{ном},m}$.

Во втором диапазоне регулирования Ψ_{2m} является переменной величиной и уменьшается пропорционально частоте тока статора. Амплитудное значение потокосцепления ротора представим в виде:

$$\Psi_{2m} = \frac{\Psi_{2\text{ном},m}}{\alpha}, \quad (3)$$

где α – относительная частота.

Используя (1–3), получены искусственные механические характеристики АД, которые представлены на рисунках 1–3.

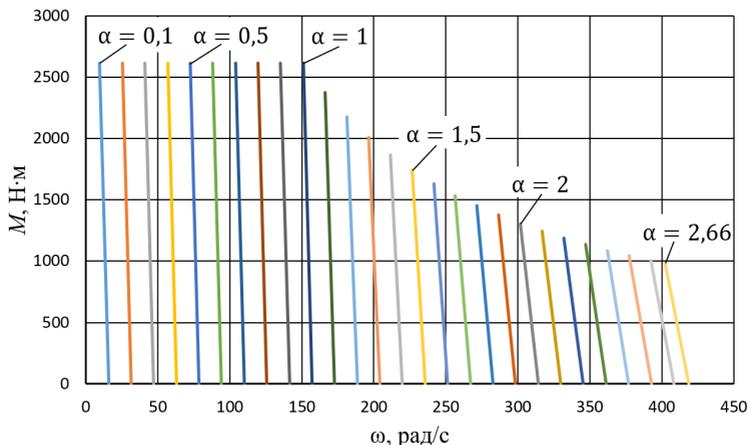


Рисунок 1 – Искусственные механические характеристики АД при максимальном моменте M_{\max}

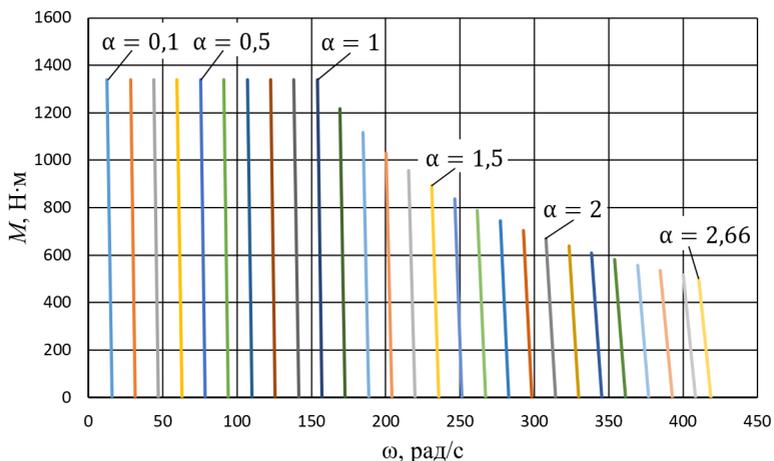


Рисунок 2 – Искусственные механические характеристики АД при потребном моменте $M_{\text{потр}}$

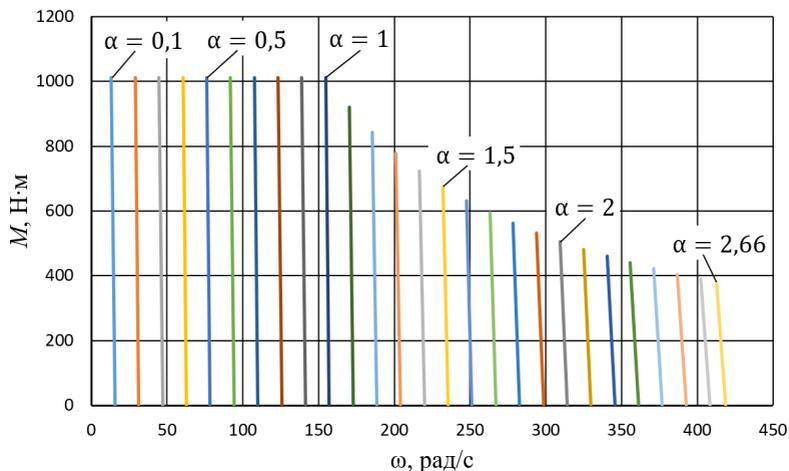


Рисунок 3 – Искусственные механические характеристики АД при номинальном моменте $M_{ном}$

В таблице 1 приведены максимальные значения искусственных механических характеристик, построенные по (1–3).

На участке $\alpha = 0,1-1$ функциональную зависимость представим в виде прямой линии:

$$M(\omega) = M_{ном}, \quad (4)$$

где $M_{ном}$ – потребный момент ТЭД.

На участке $\alpha = 1$ и выше при регулировании обеспечивается режим постоянной мощности. В работе [6] установлено, что для этого участка целесообразно механическую характеристику электродвигателя описывать степенной функцией. Используя свойства степенной функции, механическую характеристику для этого участка целесообразно представить в виде:

$$M = M_{ном} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^k, \quad (5)$$

где k – коэффициент учитывающий тип системы управления ТЭД.

Таблица 1 – Максимальные значения искусственных МХ

α	M_{\max}		$M_{\text{потр}}$		$M_{\text{ном}}$	
	ω , рад/с	M , Н·м	ω , рад/с	M , Н·м	ω , рад/с	M , Н·м
0,1	9,59	2600,25	12,57	1327,54	13,34	1000,10
0,2	25,30	2600,25	28,28	1327,54	29,05	1000,10
0,3	41,01	2600,25	43,99	1327,54	44,75	1000,10
0,4	56,72	2600,25	59,70	1327,54	60,46	1000,10
0,5	72,42	2600,25	75,40	1327,54	76,17	1000,10
0,6	88,13	2600,25	91,11	1327,54	91,88	1000,10
0,7	103,84	2600,25	106,82	1327,54	107,59	1000,10
0,8	119,55	2600,25	122,53	1327,54	123,29	1000,10
0,9	135,26	2600,25	138,24	1327,54	139,00	1000,10
1	150,96	2600,25	153,94	1327,54	154,71	1000,10
1,1	166,06	2362,77	169,34	1205,76	170,18	908,08
1,2	181,16	2164,86	184,73	1104,27	185,65	831,40
1,3	196,25	1997,41	200,13	1018,40	201,12	766,52
1,4	211,35	1853,87	215,52	944,80	216,59	710,91
1,5	226,44	1729,48	230,91	881,01	232,06	662,71
1,6	241,54	1620,63	246,31	825,19	247,54	620,54
1,7	256,64	1524,59	261,70	775,94	263,01	583,33
1,8	271,73	1439,22	277,10	732,16	278,48	550,25
1,9	286,83	1362,84	292,49	692,99	293,95	520,65
2	301,93	1294,09	307,89	657,74	309,42	494,02
2,1	317,02	1231,90	323,28	625,84	324,89	469,92
2,2	332,12	1175,35	338,67	596,85	340,36	448,01
2,3	347,22	1123,73	354,07	570,37	355,83	428,01
2,4	362,31	1076,40	369,46	546,11	371,30	409,67
2,5	377,41	1032,86	384,86	523,78	386,77	392,80
2,6	392,50	992,67	400,25	503,17	402,25	377,23
2,66	402,57	967,56	410,52	490,29	412,56	367,50

При $k = -1$ получаем идеализированную систему управления ТЭД. Для определения потребного момента электродвигателя при разгоне воспользуемся известной зависимостью из теории автомобиля [3] и применяемую при исследованиях в области электрического транспорта [4]:

$$M_{\text{номр}} = \frac{r_k}{u_{\text{мп}} \cdot \eta_{\text{мп}}} \cdot \left[m_a \cdot g \cdot \left(\psi + \frac{\delta_{n.m}}{g} \cdot \frac{d}{dt} \right) + k_{\omega} \cdot A_n \cdot v^2 \right], \quad (6)$$

где r_k – радиус колеса электробуса, м; $u_{тр}$ – передаточное число трансмиссии электробуса; $\eta_{тр}$ – К.П.Д. трансмиссии электробуса; m_a – технически допустимая максимальная масса электробуса, кг; g – коэффициент ускорения свободного падения; ψ – коэффициент суммарного дорожного сопротивления; $\delta_{п.м}$ – коэффициент приведенной массы; dv/dt – ускорение электробуса, м/с²; k_{ω} – коэффициент сопротивления воздуха; $A_{л}$ – лобовая площадь электробуса, м²; v – скорость электробуса, м/с.

Для определения коэффициента k воспользуемся методом наименьших квадратов. Результаты расчета коэффициента k с использованием данных таблицы 1 и среды MS Excel приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения коэффициента k для различных систем управления и величин моментов ТЭД

	Векторное управление	Скалярное управление
M_{\max}	-1,008	-1,863
$M_{\text{потр}}$	-1,016	-1,958
$M_{\text{ном}}$	-1,021	-1,983

Для примера построим механические характеристики двигателя электробуса с использованием зависимостей (4–6). Расчет проведем для электробуса пассажироместностью 153 человека. Ускорение при разгоне определялось из условия разгона электробуса до 40 км/ч за 15 с. Потребный момент ТЭД по (6) ($r_k = 0,469$ м; $u_{тр} = 9,81$; $\eta_{тр} = 0,941$; $m_a = 28000$ кг; $g = 9,81$ м/с; $\psi = 0,01163$; $\delta_{п.м} = ,09$; $dv/dt = 0,741$ м/с²; $k_{\omega} = 0,4$; $A_{л} = 6,6163$ м²; $v = 11,111$ м/с) составил 1328 Н·м.

Результирующая потенциальная механическая характеристика АД для двухзвенного электробуса пассажироместностью 153 человека и электродвигателем ТАД 155-04-БУ1 ТУ ВУ 700002725.142-2018 [5] представлена на рисунке 4. На данном рисунке точками представлены данные для аппроксимации, приведенные в таблице 1, непрерывными линиями по функциональным зависимостям (4–5). Наибольшее отклонение между функциональными зависимостями и расчетными точками для аппроксимации (таблица 1) не превысила 0,265 %.

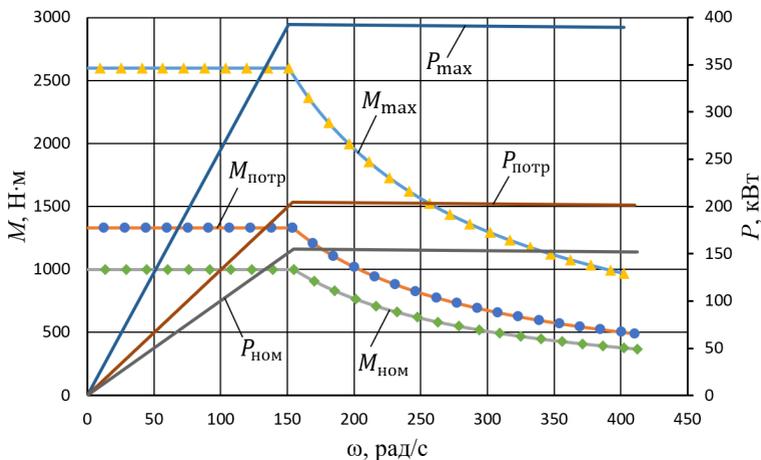


Рисунок 4 – Механическая характеристика АД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований установлено что механическую характеристику АД можно представлять в виде двух функциональных составляющих: в диапазоне $\alpha = 0,1-1$ зависимостью $M(\omega) = M_{ном}$,

а в диапазоне $\alpha = 1-2,7$ – $M = M_{ном} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^k$. Коэффициенты k

для полученных зависимостей приведены в таблице 2. Установлено что на участке $\alpha = 0,1-1$ для двухзвенного электробуса пассажироместностью 153 человека, потребный момент равен $M_{потр} = 1328$ Н·м, что составляет $1,328M_{ном}$. На втором участке потребная мощность ТЭД составила $P_{потр} = 204,4$ кВт, что составляет $1,321P_{ном}$. Наибольшая погрешность между функциональными зависимостями и расчетными точками для аппроксимации (таблица 1) составила 0,265 %. Предложенная модель позволит более эффективно исследовать тягово-скоростные свойства электробуса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Мн. : Техноперспектива, 2006. – 363 с.

2. Фираго, Б. И. Векторные системы управления электроприводами: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск : Вышэйшая школа, 2016. – 159 с.

3. Тарасик, В. П. Теория движения автомобиля: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – СПб : БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.

4. Атаманов, Ю. Е. Теория подвижного состава городского электрического транспорта: учебно-метод. пособие для студентов специальности 1-37 01 05 «Городской электрический транспорт» / Ю. Е. Атаманов, В. Н. Плищ. – Минск : БНТУ, 2013. – 267 с.

5. meз.by [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mez.by/catalog/tyagovye-dvigateli/tyagovyy-asinkhronnyy-dvigatel-s-nezavisimym-okhlazhdeniem-tad-155-04-bu1/> – Дата доступа: 16.05.2021.

6. Атаманов, Ю. Е. Определение механических характеристик частотно-регулируемого асинхронного двигателя электробуса по закону стабилизации потокосцепления ротора / Ю. Е. Атаманов, В. Н. Плищ, А. Д. Хилько // Автотракторостроение и автомобильный транспорт, Минск, 26–29 мая 2020 г. : в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Д. В. Капский (отв. редактор) [и др.]. – Минск, 2020. – Т. 1. – С. 155–163.

Представлено 26.05.2021