

УДК 621.333

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОБУСА
ПО ПРОПОРЦИОНАЛЬНОМУ ЗАКОНУ**

**DETERMINATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS
OF A FREQUENCY-CONTROLLED ASYNCHRONOUS MOTOR OF
AN ELECTRIC BUS ACCORDING TO THE PROPORTIONAL LAW**

Ю.Е. Атаманов, канд. техн. наук, доц.,

В.Н. Плищ, А.Д. Хилько

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Yu. Atamanov, PhD in Engineering, Associate Professor,

V. Plishch, A. Khilko

Belarusian national technical University,
Minsk, Belarus

На основе расчетных данных получены значения для построения механических характеристик асинхронного двигателя (АД). На их основе установлены функциональные зависимости для частотно-регулируемого АД по пропорциональному закону $U_1/f_1 = \text{const}$.

Abstract. Based on the calculated data, the values for constructing the mechanical characteristics of an asynchronous motor (AD) are obtained. Based on them, functional dependencies for frequency-controlled AD are established according to the proportional law $U_1/f_1 = \text{const}$.

Ключевые слова: электробус, частотное управление, механическая характеристика, асинхронный электродвигатель.

Key words: electric bus, frequency control, mechanical characteristic, asynchronous electric motor.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для перевозки пассажиров применяются электробусы, на которых используются АД. При выборе и анализе эксплуатационных режимов работы АД определяют механические характеристики. В связи с этим целью исследований является установление механических характеристик АД в виде функциональных зависимостей. В качестве объекта исследований принят АД ТАД 155-

04-БУ1 ТУ ВУ 700002725.142-2018 двухзвенного электробуса пассажироместимостью 153 человека.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АД

Современные системы частотного управления обычно предусматривают две зоны регулирования частоты (и, следовательно, скорости): 1) вниз от номинальной при соблюдении принятого закона частотного управления; 2) вверх от номинальной при неизменной величине напряжения на статоре $U_1 = U_{1\text{ном}}$ и $f_1 > f_{1\text{ном}}$ [1].

Механические характеристики АД при регулировании вниз от номинальной скорости строятся в диапазоне регулирования частоты ($f = 0,1-50$ Гц; $\alpha = 0,1-1$). При постоянных значениях $M_{к,\alpha}$, $S_{а,к}$ и $R_1 = 0$ механическая характеристика АД, выражаемая формулой Клосса, имеет вид [1]:

$$M = \frac{2 \cdot M_{к,\alpha} (1 + a \cdot S_{а,к})}{\frac{S_a}{S_{а,к}} + \frac{S_{а,к}}{S_a} + 2 \cdot a \cdot S_{а,к}} - M_0, \quad (1)$$

где $M_{к,\alpha}$ – критический электромагнитный момент; $S_{а,к}$ – абсолютное критическое скольжение; $S_a = S \cdot \alpha$ – абсолютное скольжение; S – текущее скольжение; α – относительная частота; a – отношение активных сопротивлений; M_0 – момент холостого хода.

Угловая скорость ротора ω при переменной частоте

$$\omega = \omega_{0\text{ном}}(\alpha - S_a), \quad (2)$$

где $\omega_{0\text{ном}}$ – синхронная скорость АД при номинальной частоте $f_{1\text{ном}}$. При регулировании вверх от номинальной скорости механические характеристики АД строятся при постоянной величине напряжения статора $U_1 = U_{1\text{ном}}$ и переменной частоте f_1 изменения этого напряжения в диапазоне частот $f_{1\text{ном}} \leq f_1 \leq f_{1\text{max}}$ ($f = 50-135$ Гц; $\alpha = 1...2,7$). При работе в этом диапазоне частот критический момент $M_{к,\alpha}$

$$M_{\kappa,\alpha} = \frac{3 \cdot U_{1\text{ном}}^2}{2 \cdot \alpha \cdot \omega_{0\text{ном}} \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (\alpha \cdot X_{\kappa,\text{ном}})^2} \right]} \quad (3)$$

и абсолютное критическое скольжение $S_{a,\kappa}$

$$S_{a,\kappa} = \frac{\alpha \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (\alpha \cdot X_{\kappa,\text{ном}})^2}} \quad (4)$$

являются функциями относительной частоты α

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} = \frac{\omega_0}{\omega_{0\text{ном}}} \quad (5)$$

где $U_{1\text{ном}}$ – номинальное фазное напряжение статора; R_1 – активное сопротивление фазы статора; $X_{\kappa,\text{ном}}$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания при номинальной частоте; R_2' – приведенное активное сопротивление ротора.

Механические характеристики АД в рассматриваемом частотном диапазоне определяются уравнениями (1)–(2). Технические характеристики объекта исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики двигателя ТАД 155-04-БУ1

Наименование параметра	Значение
Полезная мощность, кВт	155
Максимальная 30 мин мощность, кВт	185
Коэффициент мощности при номинальном напряжении и частоте тока статора	0,79
КПД при номинальном напряжении и частоте тока статора, %	90,0
Номинальное напряжение	420
Номинальная частота вращения, об/мин	1480
Максимальная частота вращения, об/мин	4000
Номинальный вращающий момент, Н·м	1000
Максимальный тяговый вращающий момент, Н·м	2600
Номинальный линейный ток статора, А	300

Номинальный момент на валу АД в продолжительном режиме работы (S1) при $\alpha = 0,1-1$:

$$M_{\text{ном.S1}} = \frac{P_{\text{ном.S1}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{155 \cdot 10^3}{154,907} = 1000,603 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальный момент на валу АД в повторно-кратковременном режиме работы (S3) при $\alpha = 0,1-1$:

$$M_{\text{ном.S3}} = \frac{P_{\text{ном.S3}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{185 \cdot 10^3}{154,907} = 1194,268 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент на валу АД при $\alpha = 0,1-1$:

$$M_{\text{max}} = M_{\text{ном.S1}} \cdot \lambda_m = 1000,603 \cdot 2,6 = 2601,567 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Обозначим $M_i = M_{\text{ном.S1}}, M_{\text{ном.S3}}, M_{\text{max}}$.

Используя (1)–(5) получены расчетные значения механических характеристик, максимальные значения которых приведены в таблице 2 и на рисунке 1 в виде точечной зависимости.

Таблица 2 – Максимальные значения характеристик АД по (1) – (5)

α	M_{max}		$M_{\text{ном.S3}}$		$M_{\text{ном.S1}}$	
	ω , рад/с	M, Н·м	ω , рад/с	M, Н·м	ω , рад/с	M, Н·м
0,1	4,15	2601,57	13,14	1194,27	13,61	1000,60
0,2	19,85	2601,57	28,84	1194,27	29,31	1000,60
0,3	35,55	2601,57	44,54	1194,27	45,01	1000,60
0,4	51,25	2601,57	60,24	1194,27	60,71	1000,60
0,5	66,95	2601,57	75,94	1194,27	76,41	1000,60
0,6	82,65	2601,57	91,64	1194,27	92,11	1000,60
0,7	98,35	2601,57	107,34	1194,27	107,81	1000,60
0,8	114,05	2601,57	123,04	1194,27	123,51	1000,60
0,9	129,75	2601,57	138,74	1194,27	139,21	1000,60
1	145,45	2601,57	154,44	1194,27	154,91	1000,60
1,1	161,15	2181,49	170,14	998,45	170,61	836,16
1,2	176,85	1854,98	185,84	846,78	186,31	708,82
1,3	192,55	1596,22	201,54	726,91	202,01	608,18
1,4	208,25	1387,70	217,24	630,52	217,71	527,26

Продолжение таблицы 2

1,5	223,95	1217,22	232,94	551,85	233,41	461,21
1,6	239,65	1076,07	248,64	486,80	249,11	406,61
1,7	255,35	957,88	264,34	432,40	264,81	360,95
1,8	271,05	857,94	280,04	386,44	280,51	322,37
1,9	286,75	772,68	295,74	347,26	296,21	289,49
2	302,45	699,36	311,44	313,59	311,91	261,23
2,1	318,15	635,85	327,14	284,44	327,61	236,76
2,2	333,85	580,48	342,84	259,04	343,31	215,44
2,3	349,55	531,91	358,54	236,77	359,01	196,75
2,4	365,25	489,07	374,24	217,13	374,71	180,28
2,5	380,95	451,10	389,94	199,74	390,41	165,67
2,6	396,65	417,29	405,64	184,25	406,11	152,68
2,7	412,35	387,05	421,34	170,40	421,81	141,05

Для установления функциональной зависимости проведем аппроксимацию результатов расчета, представленных в таблице 1. На участке $\alpha=0,1-1$ функцию представим в виде прямой линии:

$$M(\omega) = M_i. \quad)$$

В диапазоне $\alpha=1-2,7$ аппроксимацию необходимо проводить по двум крайним точкам, т. к. использование более двух точек приводит к разрыву функции в точке $\alpha=1$. В результате исследований установлено, что наиболее целесообразно в виде аппроксимирующей зависимости применять степенную функцию вида:

$$M(\omega) = a \cdot \omega^b, \quad (7)$$

где a и b – коэффициенты.

Для нахождения коэффициентов a и b можно использовать метод наименьших квадратов либо инструментарий MS Excel.

Применив (6) и (7), характеристику двигателя можем представить в виде функций, приведенных в таблице 3.

Используя данные таблицы 3, построены характеристики двигателя, которые представлены на рисунке 1 в виде сплошных линий. Установлено, что ошибка для режима S1 не превышает 2,87 %, для режима S3 – 2,64 % и для M_{max} – 2,98 %.

Таблица 3 – Функциональные данные для режимов работы АД

	$\alpha=0,1-1$	$\alpha=1-2,7$
$M=f(\omega)$	$M(\omega) = M_i$	$M(\omega) = a \cdot \omega^b$
$M_{max}, \text{Н}\cdot\text{м}$	2601,567	$a = 23428561,288$ $b = -1,828$
$M_{ном.S3}, \text{Н}\cdot\text{м}$	1194,268	$a = 21060718,27$ $b = -1,94$
$M_{ном.S1}, \text{Н}\cdot\text{м}$	1000,603	$a = 19218534,663$ $b = -1,956$

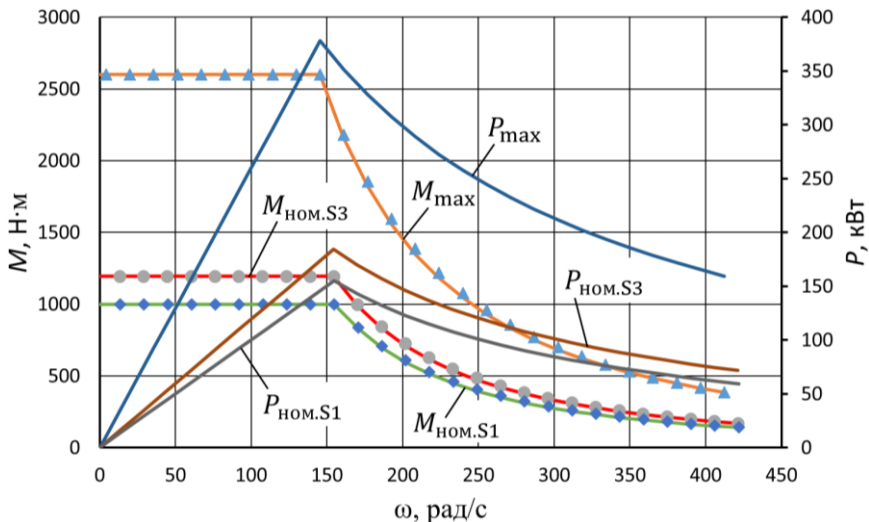


Рисунок 1 – Механическая характеристика АД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований установлено что, механическую характеристику АД можно представить в виде двух функциональных составляющих: в диапазоне $\alpha=0,1-1$ зависимостью $M(\omega) = M_i$, а в диапазоне $\alpha=1-2,7$ — $M(\omega) = a \cdot \omega^b$. Коэффициенты a и b для полученных зависимостей даны в таблице 3. Это позволит более эффективно исследовать тягово-скоростные свойства электробуса. Также установлено, что на участке $\alpha=1-2,7$ мощность не постоянна и изменяется при режиме работы S1 с 155 по 59,5 кВт, при режиме работы S3 — с 184,4 по 71,8 кВт и при M_{max} с 378,4 по 159,6 кВт. При этом относительная величина моментов АД $M(\alpha=2,7)/M(\alpha=1)$ составила: при S1 — 14,1 %; при S3 — 14,27 %; при M_{max} — 14,88 %.

ЛИТЕРАТУРА

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

Представлено 20.05.2020

УДК 615.83

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПОВЫШЕНИЯ МОБИЛЬНОСТИ ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

**DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR INCREASING
THE MOBILITY OF PEOPLE WITH DISABILITIES**

Т.О. Ларионова, магистр-инженер, мл. научн. сотр.,
Д.М. Малинов, техник, **С.Н. Янкевич**, магистр-инженер, нач. НИО,
ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» г. Минск, Беларусь
T. Larionava, Master of Engineering sciences, Junior Researcher,
D. Malinov, technician, S. Yankevich, Master of Engineering sciences,
the Head of the Research Department,
JSC «Instrument-Making Plant OPTRON», Minsk, Belarus

В данной статье рассматривается проблема реабилитации и мобильности людей с ограниченными возможностями, а также анализ устройств, способствующих улучшению качества их жизни.

This article discusses the problem of rehabilitation and mobility of people with disabilities, as well as an analysis of devices that improve their quality of life.

Ключевые слова: инвалид, инвалидное кресло, электропривод.

Key words: disabled person, wheelchair, electric.

ВВЕДЕНИЕ

Количество инвалидов-колясочников составляет более 20 000 и растет с каждым годом. Городская среда становится все доступнее для инвалидов, однако перемещаться на инвалидном кресле при по-