

УДК 621.333

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОБУСА ПО ЗАКОНУ  
СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ РОТОРА**  
DETERMINATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS  
OF A FREQUENCY-CONTROLLED ASYNCHRONOUS MOTOR  
OF AN ELECTRIC BUS ACCORDING TO THE LAW  
OF STABILIZATION OF THE FLOW COUPLING OF THE ROTOR

**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 характеристики асинхронного двигателя (АД) по закону стабилизации потокосцепления ротора  $\psi_2 = \text{const}$ . Выбран вид и установлены функциональные зависимости АД.*

*Based on the calculated data, the characteristics of the asynchronous motor (AD) according to the law of stabilization of the flow coupling of the rotor  $\psi_2 = \text{const}$  are obtained. The AD type is selected and functional dependencies are set.*

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

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

## ВВЕДЕНИЕ

Для эффективного управления электробусом необходимо более точно управлять моментом АД в режиме постоянной мощности. Данная задача эффективно решается путем использования системы частотного управления АД по закону стабилизации потокосцепления

ротора  $\psi_2 = \text{const}$ . В связи с этим целью исследований является выбор и установление функциональных зависимостей механических характеристик (МХ) АД. В качестве объекта исследований принят АД ТАД 155-04-БУ1 ТУ ВУ 700002725.142-2018.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АД

При частотном управлении АД по закону  $\psi_2 = \text{const}$  уравнение механических характеристик определяется формулой [1]:

$$\omega = \alpha \cdot \omega_{0 \text{ ном}} - \frac{M}{\beta} \quad (1)$$

где  $\alpha$  – относительная частота;  $\omega_{0 \text{ ном}}$  – синхронная угловая скорость при номинальной частоте  $f_{1 \text{ ном}}$ ;  $\omega_{0 \text{ ном}} = (2 \cdot \pi \cdot f_{1 \text{ ном}}) / p_{\text{п}}$ , где  $p_{\text{п}}$  – число пар полюсов;  $\beta$  – модуль жесткости механических характеристик АД;  $\beta = [3 \cdot (p_{\text{п}} \cdot \psi_{2 \text{ ном}})^2] / R'_2$ , где  $R'_2$  – приведенное активное сопротивление ротора;  $\psi_{2 \text{ ном}}$  – номинальное потокосцепление ротора;  $\psi_{2 \text{ ном}} = M_{\text{э.ном}} / (3 \cdot p_{\text{п}} \cdot I'_{2 \text{ ном}})$ , где  $M_{\text{э.ном}}$  – номинальный электромагнитный момент;  $I'_{2 \text{ ном}}$  – номинальный ток ротора;  $I'_{2 \text{ ном}} = I_{1 \text{ ном}} \cdot \sqrt{\cos \varphi_{\text{ном}}}$ , где  $I_{1 \text{ ном}}$  – номинальный ток фазы статора;  $\cos \varphi_{\text{ном}}$  – номинальный коэффициент мощности.

При  $\alpha = 0, 1 \dots 1$  МХ представляют собой уравнения прямых линий, поэтому для их построения достаточно знать две точки:

- 1)  $M = 0$ ;  $\omega = \alpha \cdot \omega_{0 \text{ ном}}$ ;
- 2)  $M_i = M_{\text{э.}i} - M_0$ ;  $\omega = \alpha \cdot \omega_{0 \text{ ном}} - M_i / \beta$ ,

где  $M_{\text{э.}i} = M_{\text{э.ном.S1}}, M_{\text{э.ном.S3}}, M_{\text{э.мах}}$  – электромагнитные моменты АД при режимах работы S1, S3 и максимальном соответственно;  $M_0$  – момент холостого хода АД (для ТАД 155-04-БУ1 согласно методике [1]  $M_0 = 12,1$  Н·м, что составило 1,2% от  $M_{\text{э.ном}}$ ).

При  $\alpha = 1-2,7$  МХ представляют собой также уравнения прямых линий и для их построения необходимо знать две точки:

- 1)  $M = 0$ ;  $\omega = \alpha \cdot \omega_{0 \text{ ном}}$ ;
- 2)  $M = \left( 3 \cdot p_{\text{п}} \cdot \frac{\psi_{2 \text{ ном}}}{\alpha} \cdot I'_{2i} \right) - M_0$ ;  $\omega = \alpha \cdot \omega_{0 \text{ ном}} - M / \beta$ ,

где  $I'_{2i}$  – ток ротора при соответствующем  $M_{э,i}$ ,  $\beta$  – модуль жесткости механических характеристик АД при соответствующей  $\alpha$ :

$$I'_{2i} = \frac{M_{э,i}}{3 \cdot p_{п} \cdot \Psi_{2НОМ}}; \beta = \frac{3 \cdot (p_{п} \cdot \Psi_{2НОМ})^2}{R'_{2,0}}.$$

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

В таблице 1 приведены максимальные значения искусственных механических характеристик согласно (1).

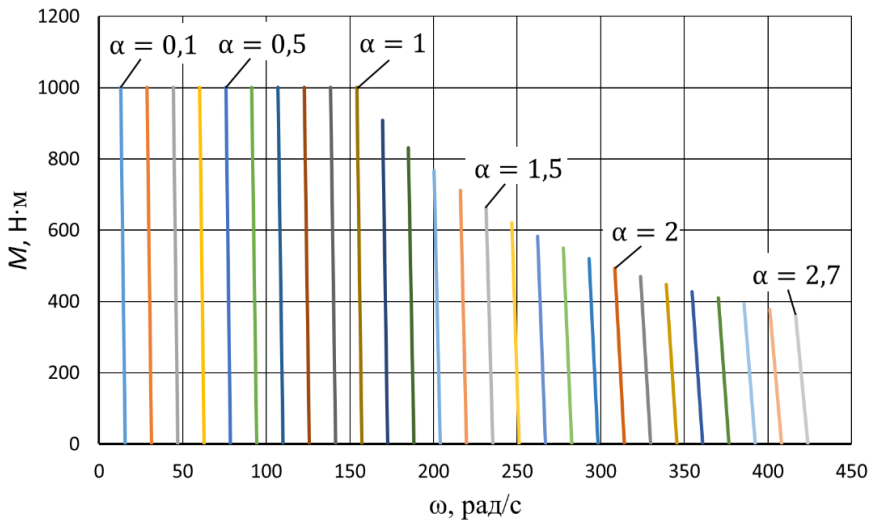


Рисунок 1 – Искусственные механические характеристики АД при режиме работы S1

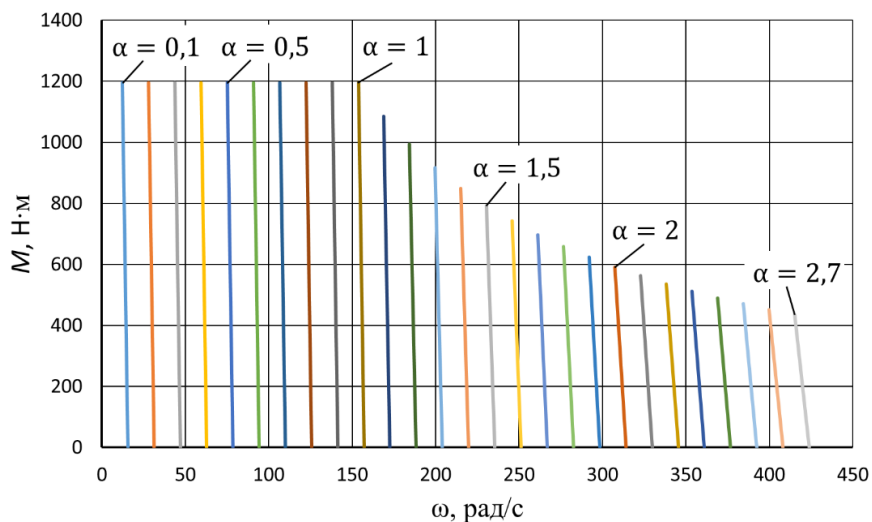


Рисунок 2 – Искусственные механические характеристики АД при режиме работы S3

Таблица 1 – Максимальные значения искусственных МХ

$\alpha$	$M_{max}$		$M_{ном.S3}$		$M_{ном.S1}$	
	$\omega$ , рад/с	М, Н·м	$\omega$ , рад/с	М, Н·м	$\omega$ , рад/с	М, Н·м
0,1	8,40	2601,57	12,35	1194,27	12,89	1000,60
0,2	24,10	2601,57	28,05	1194,27	28,59	1000,60
0,3	39,80	2601,57	43,75	1194,27	44,29	1000,60
0,4	55,50	2601,57	59,45	1194,27	59,99	1000,60
0,5	71,20	2601,57	75,15	1194,27	75,69	1000,60
0,6	86,90	2601,57	90,85	1194,27	91,39	1000,60
0,7	102,60	2601,57	106,55	1194,27	107,09	1000,60
0,8	118,30	2601,57	122,25	1194,27	122,79	1000,60
0,9	134,00	2601,57	137,95	1194,27	138,49	1000,60
1	149,70	2601,57	153,65	1194,27	154,19	1000,60
1,1	164,67	2363,96	169,02	1084,60	169,62	908,54
1,2	179,65	2165,96	184,39	993,21	185,04	831,82
1,3	194,62	1998,42	199,76	915,88	200,46	766,91
1,4	209,60	1854,81	215,13	849,60	215,89	711,27
1,5	224,58	1730,36	230,50	792,16	231,31	663,05
1,6	239,55	1621,45	245,87	741,89	246,74	620,85
1,7	254,53	1525,36	261,24	697,54	262,17	583,62
1,8	269,51	1439,95	276,62	658,12	277,60	550,53

Продолжение таблицы 1

1,9	284,49	1363,53	291,99	622,85			293,02	520,92
2	299,47	1294,75	307,37	591,10			308,45	494,27
2,1	314,45	1232,52	322,74	562,38			323,88	470,16
2,2	329,43	1175,95	338,12	536,27			339,31	448,24
2,3	344,41	1124,30	353,49	512,43			354,74	428,22
2,4	359,39	1076,95	368,87	490,57			370,18	409,88
2,5	374,38	1033,39	384,25	470,47			385,61	393,00
2,6	389,36	993,18	399,63	451,91			401,04	377,42
2,7	404,35	955,95	415,01	434,72			416,47	363,00

Для выбора аппроксимирующей зависимости проведена оценка функций вида:  $M = a \cdot \omega^b$ ;  $M = a_2 \cdot \omega^2 + a_1 \cdot \omega + a_0$ ;  $M = a \cdot \ln(\omega) + b$ ;  $M = a \cdot e^{b \cdot \omega}$ . Результаты анализа в среде MS Excel для различных режимов даны на рисунках 4 – 6 и в таблице 2.

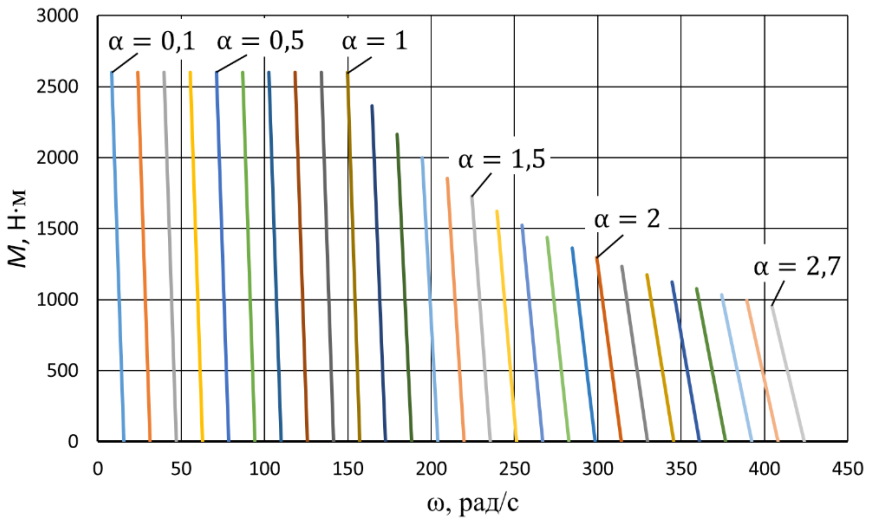


Рисунок 3 – Искусственные механические характеристики АД при максимальном режиме работы  $M_{\max}$

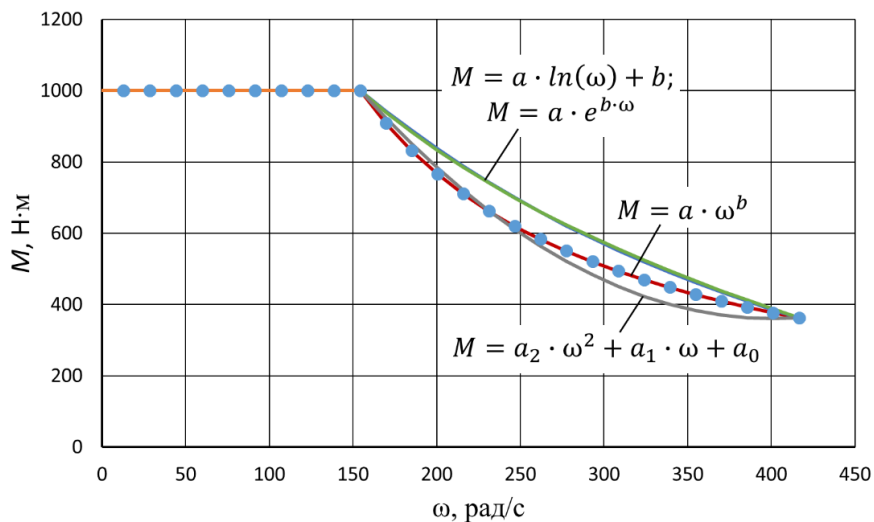


Рисунок 4 – Функциональный анализ характеристик для режима работы S1

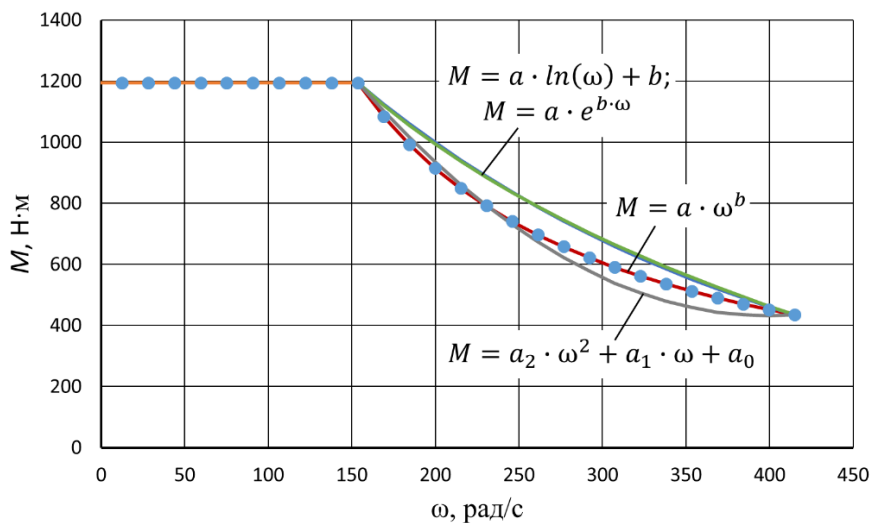


Рисунок 5 – Функциональный анализ характеристик для режима работы S3

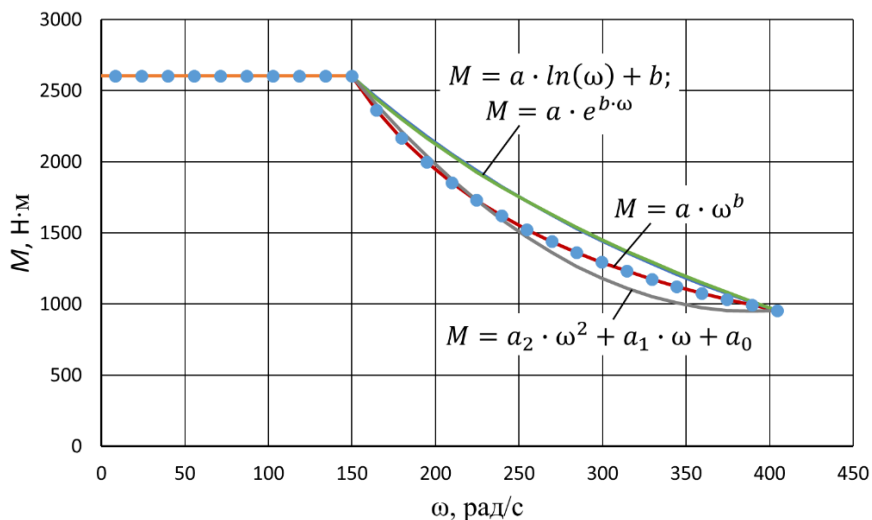


Рисунок 6 – Функциональный анализ характеристик для максимального режима работы  $M_{max}$

Таблица 2 – Результаты проверки адекватности модели

Вид функциональной зависимости	Максимальное отклонение %, для соответствующего режима АД		
	$M_{max}$	$M_{ном, S3}$	$M_{ном, S1}$
$M = a \cdot \omega^b$	0,093	0,211	0,254
$M = a_2 \cdot \omega^2 + a_1 \cdot \omega + a_0$	10,49	10,61	10,67
$M = a \cdot \ln(\omega) + b$	11,54	11,64	11,68
$M = a \cdot e^{b \cdot \omega}$	11,45	11,45	11,46

Установлено, что целесообразно использовать зависимость вида  $M = a \cdot \omega^b$ , где  $a$  и  $b$  – коэффициенты аппроксимации. На участке  $\alpha=0,1-1$  функциональную зависимость представим в виде прямой линии:

$$M(\omega) = M_i. \quad (2)$$

В диапазоне  $\alpha=1-2,7$  – по двум точкам, т. к. использование более двух точек приводит к разрыву функции в точке  $\alpha=1$ .

Тогда для интервала  $\alpha=1-2,7$  примем функцию вида:

$$M(\omega) = a \cdot \omega^b. \quad (3)$$

Используя (2) и (3) и определив  $a$  и  $b$  по методу наименьших квадратов, функциональные зависимости для режимов  $M_{\text{НОМ.S1}}$ ,  $M_{\text{НОМ.S3}}$ ,  $M_{\text{max}}$  МХ АД представим в виде таблицы 3.

Таблица 3 – Функциональные данные для режимов работы АД

	$\alpha=0,1-1$	$\alpha=1-2,7$
$M=f(\omega)$	$M(\omega) = M_i$	$M(\omega) = a \cdot \omega^b$
$M_{\text{max}}$ , Н·м	2601,567	$a = 404524,985; b = -1,008$
$M_{\text{НОМ.S3}}$ , Н·м	1194,268	$a = 199955,253; b = -1,017$
$M_{\text{НОМ.S1}}$ , Н·м	1000,603	$a = 171047,407; b = -1,020$

По данным таблицы 3 построены характеристики АД. Результаты приведены на рисунке 7 сплошными линиями.

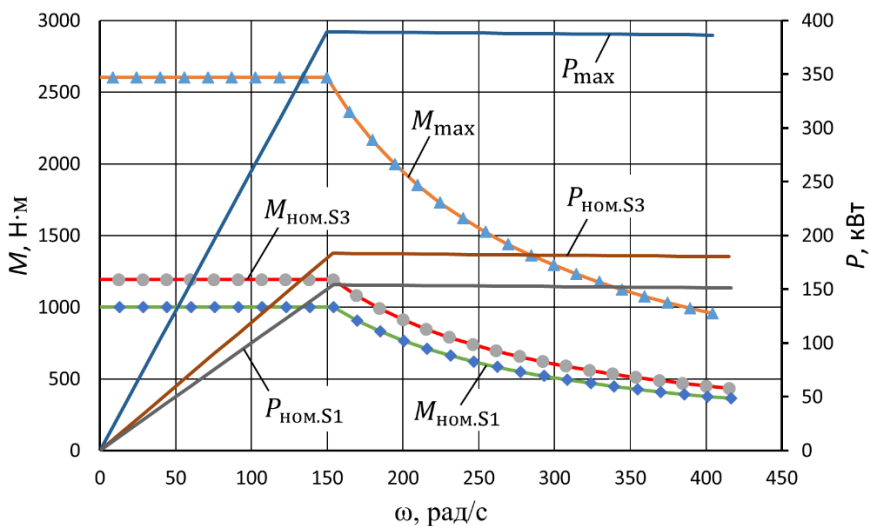


Рисунок 7 – Механическая характеристика АД

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что МХ АД при законе  $\psi_2 = \text{const}$  можно представить в виде: при  $\alpha=0,1-1$  зависимостью  $M(\omega) = M_i$ , при  $\alpha=1-2,7$  –  $M(\omega) = a \cdot \omega^b$ . Коэффициенты  $a$  и  $b$  даны в таблице 3. Данное пред-



ставление МХ 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 154,3 по 151,2 кВт, при режиме работы S3 – с 183,5 по 180,4 кВт и при  $M_{max}$  с 389,5 по 386,5 кВт. При этом относительная величина моментов АД  $M(\alpha=2,7)/M(\alpha=1)$  составила: при S1 – 36,28 %; при S3 – 36,4 %; при  $M_{max}$  – 36,75 %. Если принять  $M_0 = 0$ , на участке  $\alpha=1\dots 2,7$  мощность будет постоянна и составит: при S1 – 154,3 кВт, S3 – 183,5 кВт и  $M_{max}$  – 389,5 кВт;  $M(\alpha=2,7)/M(\alpha=1)$  при всех режимах работы АД примет значение 37,04 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

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

Представлено 20.05.2020