

АНАЛИЗ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ОПРЕДЕЛЕННЫХ АНАЛИТИЧЕСКИМ И ИТЕРАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

В. О. Квашнин, В. А. Косенко, В. В. Квашнин

Донбасская государственная машиностроительная академия

Аннотация. В работе приведены результаты исследований различных методик по определению значений фазных сопротивлений статорной и роторной цепи асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в диапазоне мощностей 0,18-75кВт. Проведена оценка точности найденных параметров путем сопоставления рассчитанных на их основе характерных точек статической механической характеристики (пусковой, критической и номинальной) с паспортными данными, а также определены и проанализированы их относительные погрешности.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, фазные сопротивления, пусковой, критический и номинальный моменты, относительная погрешность.

Введение

Знание значений фазных сопротивлений асинхронных двигателей (АД) необходимо при определении их статических характеристик, построении динамических моделей двигателей и проектировании современных регулируемых электроприводов. Такие данные редко встречается в литературе, а если они и есть, то приводятся лишь для некоторых АД [1] или представлены в виде относительных величин, которые еще также нужно переводить в именованные единицы посредством нахождения базисных величин сопротивлений [2]. Из рассмотренных Т- и Г-образных эквивалентных схем замещения АД (рис. 1, 2) известные методики по определению их параметров [3] можно разделить на две группы.

Первая – аналитические [4,5], базирующиеся на рассмотрении наиболее полной Т-образной эквивалентной схемы замещения и использующие дополнительные к каталожным или паспортным данные, которые могут быть определены для рассматриваемых электродвигателей;

вторая — итерационные [6,7], использующие упрощенную Г-образную схему замещения и минимум данных в АД, которые, как правило, имеются в его паспорте или могут быть взяты из каталогов. Следует отметить, что итерационная методика DVIGATEL изначально задумывалась и разрабатывалась как одно из альтернативных, надежных и простых инженерных средств – для определения основных параметров схемы замещения АД – r_1 , r_2' и X_k , не требующих определения никаких дополнительных данных за исключением паспортных.

© Квашнин В. О. Косенко В. А.,
Квашнин В. В. 2018

Она не претендует на абсолютную – позволяющую с высокой степенью точности определять “истинные” значения фазных сопротивлений, а только лишь дает возможность для их математического определения при решении известных в теории электропривода расчетных соотношений. Полученные таким путём значения фазных сопротивлений позволяют, по мере возможности, попадать в характерные точки статической механической характеристики, за которые несет ответственность завод-изготовитель.

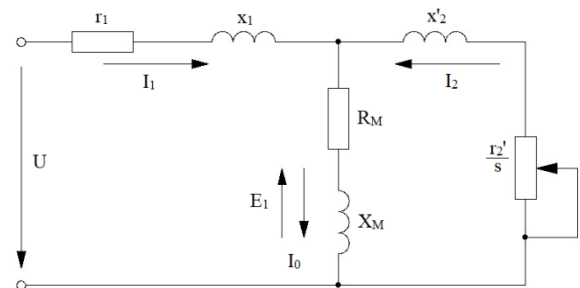


Рис. 1. Т-образная схема замещения

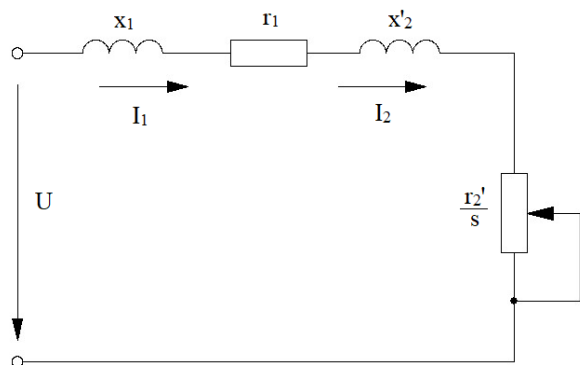


Рис. 2. Г-образная схема замещения

Как известно, параметры схемы замещения не остаются неизменными при различных режимах работы машины. С увеличением нагрузки увеличивается поток рассеяния, и в связи с этим

из-за возрастания насыщения отдельных участков магнитопровода полями рассеяния, уменьшаются индуктивные сопротивления x_1 и x'_2 .

В процессе разгона до установившейся скорости холостого хода, индуктивное сопротивление ротора x'_2 также изменяется от $x'_2 = x'_{2max}$ в начале (при пуске, когда $\omega = 0$) до $x'_2 = x'_{2min}$ в конце разгона (когда $\omega = \omega_{х.х.}$). [8]

В свою очередь, увеличение скольжения в двигателях с короткозамкнутым ротором приводит к возрастанию действия эффекта вытеснения тока, что также вызывает изменение сопротивлений обмотки ротора r'_2 и x'_2 .

Следовательно, при расчете пусковых режимов, в которых токи машины значительно превышают номинальный, а частота тока в роторе близка к частоте питающей сети, желательно учитывать изменение параметров от насыщения участков магнитопровода полями рассеяния и от влияния эффекта вытеснения тока.

Однако, степень влияния поля рассеяния на x_1 и x'_2 зависит от токов в обмотках. В свою очередь, от этих сопротивлений существенно зависят токи статора и ротора. Поэтому прямой расчет $x_{1нас}$ и $x'_{2нас}$ до получения пусковых характеристик невозможен. (Значения $x_{1нас}$ и $x'_{2нас}$ необходимо находить для каждого из назначенных скольжений методом последовательных приближений, объем расчета этим методом зависит от правильного первоначального задания искомой величины и т.д.).

Учет изменяющихся параметров схемы замещения для определения различных моментов (пусковых, максимальных или номинальных) с применением аналитических методов в каждом случае, требует дополнительного определения параметров электрической машины – ее конструкции, геометрии пазов, электромагнитных свойств и характеристик материалов и т.д., данные, о которых отсутствуют в паспортах.

Методика определения параметров упрощенной Г-образной схемы замещения АД с учетом эффекта вытеснения тока в роторе, реализованная в программе DVIGATEL2, по своей сути также является итерационной и представляет собой дальнейшее логическое развитие методики DVIGATEL.

Весь алгоритм для определения параметров АД по паспортным данным и построения его механических характеристик («рабочей», «пусковой» и «результатирующей») заключается в трех этапах. На первом этапе по номинальной (рабочей точке) определяют параметры

сопротивлений упрощенной Г-образной схемы замещения, далее их корректируют на втором этапе по критической точке и на третьем этапе уточняют $r'_{2п}$ по пусковой точке (пусковому моменту).

Основные расчетные соотношения методики с учетом вытеснения тока в роторе имеют следующий вид (1,2,3,4).

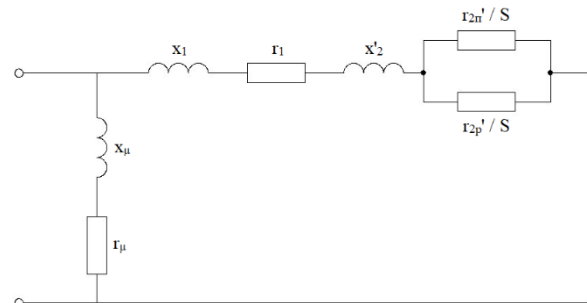
$$\begin{cases} I_H = \frac{U}{Z_H} \\ \cos\varphi_H = \frac{r_1 + r'_2 / S_H}{Z_H} \\ \eta_H = \frac{2(1 - S_H)}{2 + \alpha S_H} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Z_H = \frac{U}{I_H}; \\ r_1 = \frac{Z_H \cos\varphi_H}{\eta_H}; r'_2 = \frac{r_1 \eta_H S_H}{1 - S_H - \eta_H} \\ X_k = \frac{U}{I_H} \end{cases} \quad (1)$$

$$r'_1 = \frac{r_1 \cdot \eta \cdot S_H}{1 - S_H - \eta} \quad (2)$$

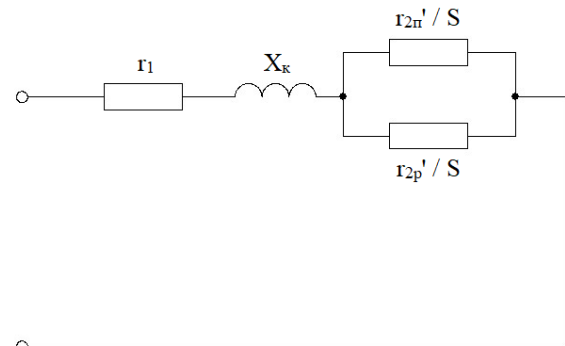
$$r'_2 = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot S_k}{2 \cdot M_k \cdot \omega_0} - r_1 \cdot S_k \quad (3)$$

$$X_k = \sqrt{\frac{r_2'^2 - S_k^2 \cdot r_1'^2}{S_k^2}} \quad (4)$$

Схемы замещения с учетом вытеснения тока в роторе (преобразованная и упрощенная расчетная) представлены на рисунке 3.



а) преобразованная



б) упрощенная расчетная

Рис. 3. Однофазная эквивалентная схема замещения АД (а, б)

Цель

Целью проводимых исследований являлось сопоставление аналитической (наиболее полной) методики по определению параметров (значений фазных сопротивлений) и полученных на их основе статических естественных механических характеристик АД с двумя предлагаемыми итерационными методиками на основе метода последовательных итераций.

Задачи (этапы) исследования

- 1) Определение критериев оценки найденных параметров однофазной эквивалентной схемы замещения по различным методикам;
- 2) Определение параметров АД для десяти отобранных двигателей серии АИР в диапазоне мощностей 0,18 – 75 кВт аналитическим методом;
- 3) Определение параметров АД для рассматриваемых двигателей итерационным методом;
- 4) Обработка и анализ полученных результатов

Исследования

Критерием для оценки полученных результатов могут послужить найденные значения фазных сопротивлений и на их основе определенные естественные механические характеристики в области их характерных точек.

Дополнительно, найденные по трем различным методикам значения характерных точек естественных статических механических характеристик будут сопоставлены с соответствующими значениями определенными по каталожным данным.

Для проведения сравнительных исследований из каталога было отобрано десять АД в диапазоне мощностей от 180 Вт до 75 кВт (таблица1). Если аналитические методы определения параметров АД достаточно хорошо представлены в литературе [2-5,9-13], то в качестве итерационных методик для сравнения были взяты методики, реализованные на языке Delphi в виде прикладных программ Dvigate1 и Dvigate2 [6,7].

Результаты расчетов параметров статорной и роторной цепей АД с КЗ ротором по указанным методикам, а также данные, взятые по справочной литературе [2] были сведены в таблицу 2.

Таблица 1

Каталожные данные асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Электродвигатель	P_n , кВт	n_n , об/мин	I_n , А	η , %	$\cos\phi$	I_n/I_n	M_n/M_n	M_k/M_n	J , кг•м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
АИР56А2	0,18	2700	0,55	65	0,77	5	2,2	2,2	0,00042
АИР80А2	1,5	2880	3,2	82	0,85	6,5	2,2	2,6	0,0015
АИР100L2	5,5	2850	11	88	0,88	7,5	2,1	2,4	0,0080
АИР132М2	11	2910	21,1	88,0	0,90	7,5	1,6	2,0	0,0227
АИР 180S2	22	2940	41	90,0	0,90	7,5	2,0	2,3	0,0620
АИР180М2	30	2950	55,4	91,4	0,90	7,5	2,0	2,3	0,0700
АИР200М2	37	2950	70	91,5	0,88	7,5	2,0	2,3	0,1400
АИР200L2	45	2960	84	92,0	0,88	7,5	2,0	2,3	0,1600

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
АИР225М2	55	2970	100	93	0,90	7,5	2,0	2,3	0,2000
АИР250S2	75	2975	134,6	93	0,91	7,0	2,0	2,3	0,3500

Таблица 2

Параметры статорной и роторной цепи АД

Электродвигатель	Методика	R_1'	X_1'	R_2''	X_2''	X_k
1	2	3	4	5	6	7
АИР56А2	Аналит. метод.	36,276	49,512	58,487	66,142	117,885
	Dvigatel	96,315	33,761	42,77	33,761	67,521
	Dvigatel 2	85,32	106,82	22,183	106,82	213,64
	Справоч. данные	68,635	20,994	33,914	27,05	50,336
АИР80А2	Аналит. метод.	3,23	7,201	3,162	9,736	17,146
	Dvigatel	10,9	4,19	2,75	4,19	8,38
	Dvigatel 2	8,5	10,457	2,916	10,457	20,915
	Справоч. данные	5,667	3,441	3,306	5,465	8,906
АИР100L2	Аналит. метод.	1,565	1,343	1,024	1,82	3,2
	Dvigatel	3,128	1,161	0,923	1,161	2,322
	Dvigatel 2	1,293	2,025	0,813	2,025	4,049
	Справоч. данные	1,022	1,104	0,736	2,249	3,35
АИР132М2	Аналит. метод.	0,643	1,016	0,316	1,378	2,418
	Dvigatel	2,342	1,089	0,24	1,089	2,178
	Dvigatel 2	0,868	1,176	0,255	1,176	2,351
	Справоч. данные	0,418	0,638	0,261	1,255	2,002
АИР180S2	Аналит. метод.	0,248	0,465	0,111	0,631	1,107
	Dvigatel	1,135	0,551	0,083	0,551	1,102
	Dvigatel 2	0,393	0,573	0,088	0,573	1,146
	Справоч. данные	0,16	0,486	0,107	0,588	1,068
АИР180М2	Аналит. метод.	0,173	0,347	0,068	0,471	0,826
	Dvigatel	0,856	0,419	0,052	0,419	0,838
	Dvigatel 2	0,25	0,399	0,056	0,399	0,798
	Справоч. данные	0,119	0,291	0,072	0,438	0,731
АИР200М2	Аналит. метод.	0,141	0,281	0,055	0,382	0,67
	Dvigatel	0,694	0,34	0,042	0,34	0,679
	Dvigatel 2	0,19	0,312	0,044	0,312	0,624
	Справоч. данные	0,092	0,297	0,066	0,379	0,676

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
АИР200L2	Аналит. метод.	0,094	0,243	0,037	0,331	0,579
	Dvigatel	0,593	0,293	0,026	0,293	0,585
	Dvigatel 2	0,147	0,253	0,037	0,253	0,505
	Справоч. данные	0,071	0,23	0,052	0,34	0,577
АИР200L2	Аналит. метод.	0,094	0,243	0,037	0,331	0,579
	Dvigatel	0,593	0,293	0,026	0,293	0,585
	Dvigatel 2	0,147	0,253	0,037	0,253	0,505
	Справоч. данные	0,071	0,23	0,052	0,34	0,577
АИР225M2	Аналит. метод.	0,059	0,209	0,023	0,284	0,497
	Dvigatel	0,5	0,247	0,016	0,247	0,494
	Dvigatel 2	0,12	0,21	0,019	0,21	0,42
	Справоч. данные	0,057	0,181	0,042	0,265	0,45
АИР250S2	Аналит. метод.	0,036	0,156	0,014	0,212	0,372
	Dvigatel	0,374	0,186	0,0094	0,186	0,371
	Dvigatel 2	0,093	0,166	0,011	0,166	0,331
	Справоч. данные	0,034	0,131	0,025	0,213	0,344

На рисунках 4 – 8 представлены зависимости полученных параметров активных и индуктивных сопротивлений статорной и роторной обмоток от мощности АД.

Если исключить маломощные двигатели и брать во внимание аналогичные зависимости фазных сопротивлений от мощности АД 5,5-75 кВт, то они примут вид, приведенный на рисунках 9 – 13 соответственно

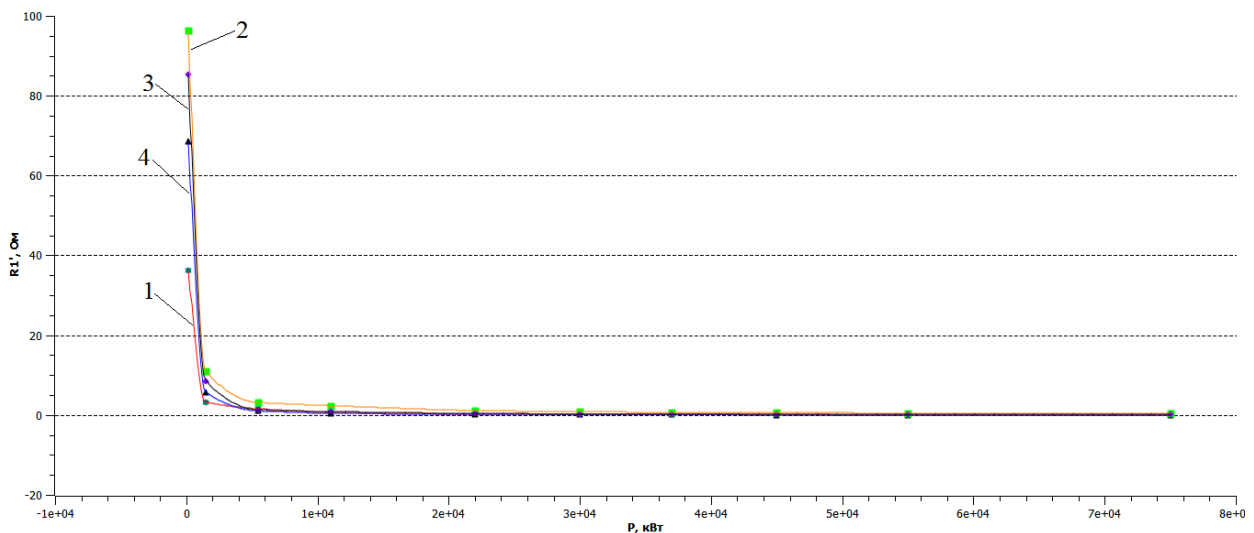


Рис. 4. Активное сопротивление статора

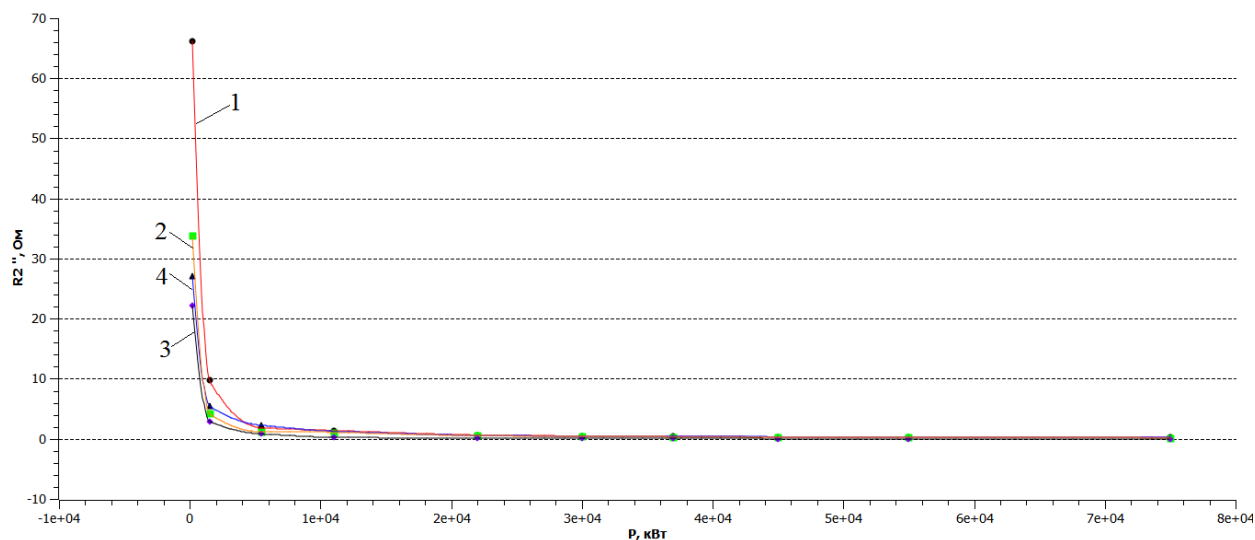


Рис. 5. Активное сопротивление ротора

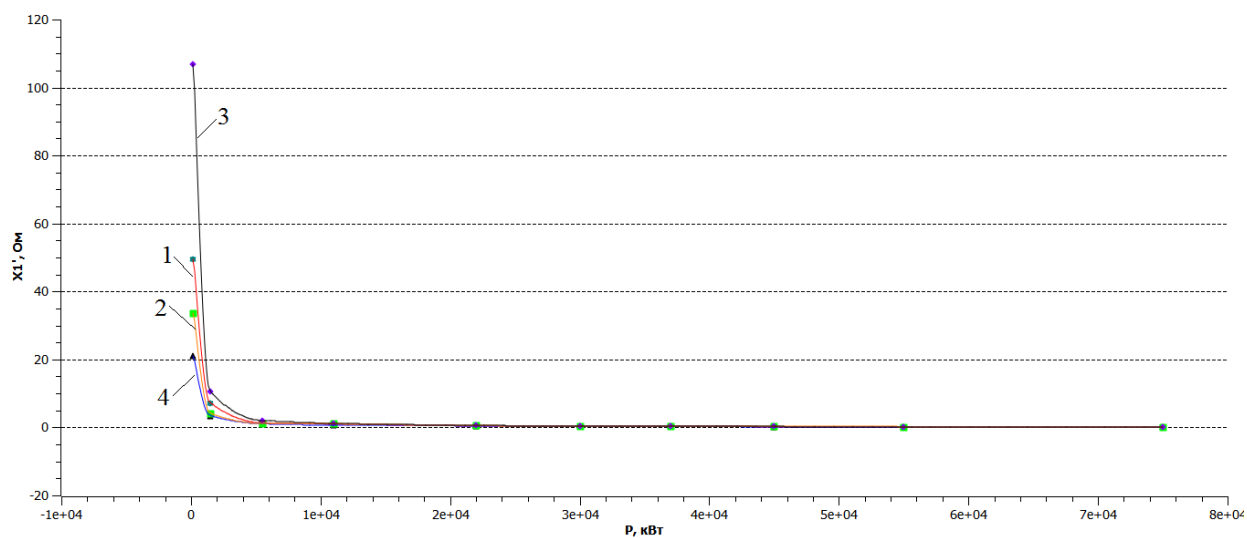


Рис. 6. Индуктивное сопротивление рассеяния статора

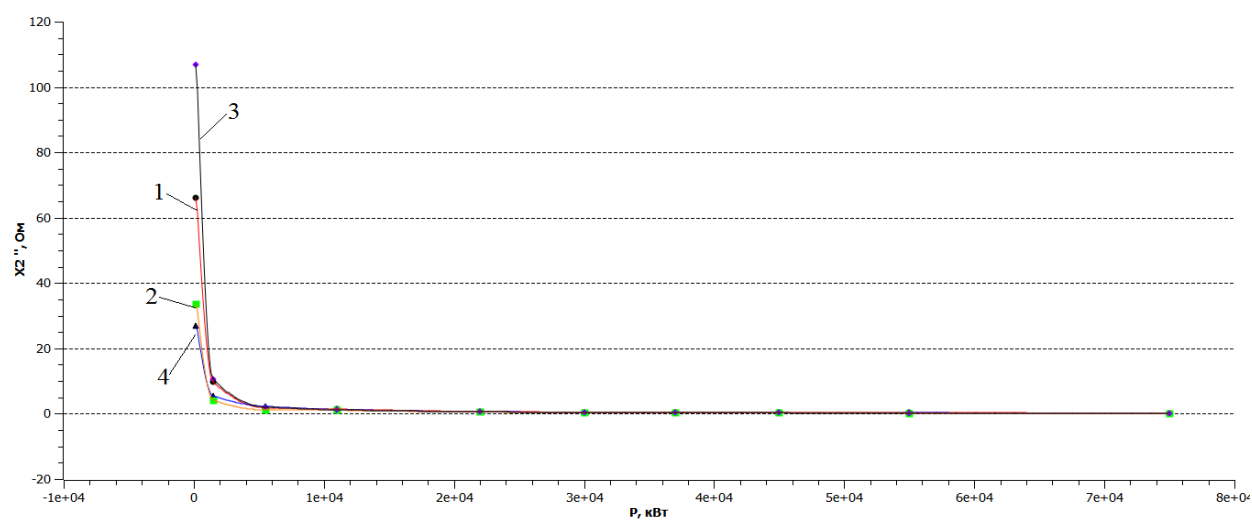


Рис. 7. Индуктивное сопротивление рассеяния ротора

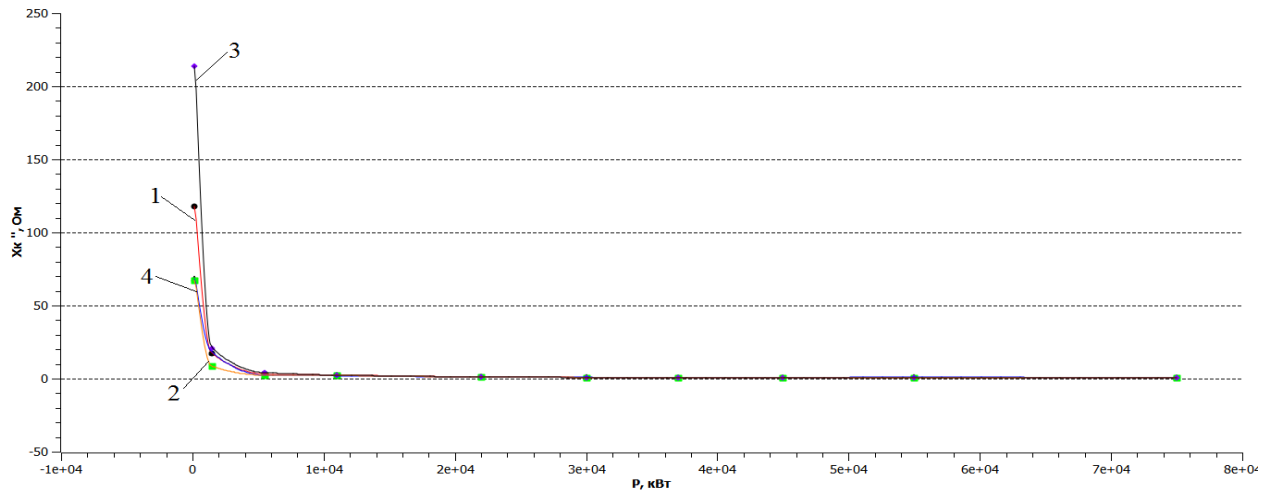


Рис. 8. Индуктивное сопротивление короткого замыкания

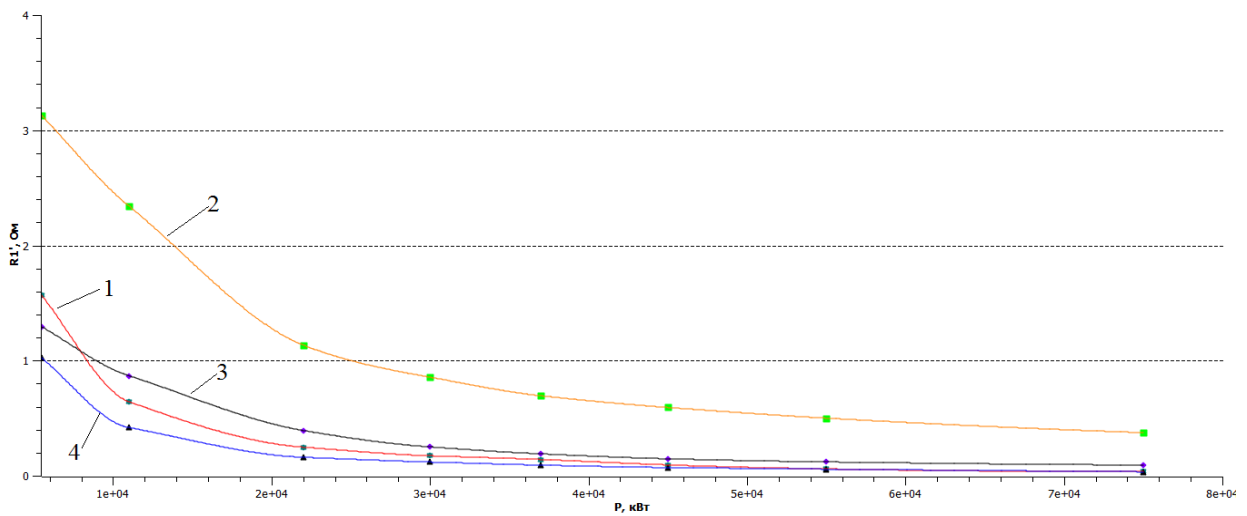


Рис. 9. Активное сопротивление статора

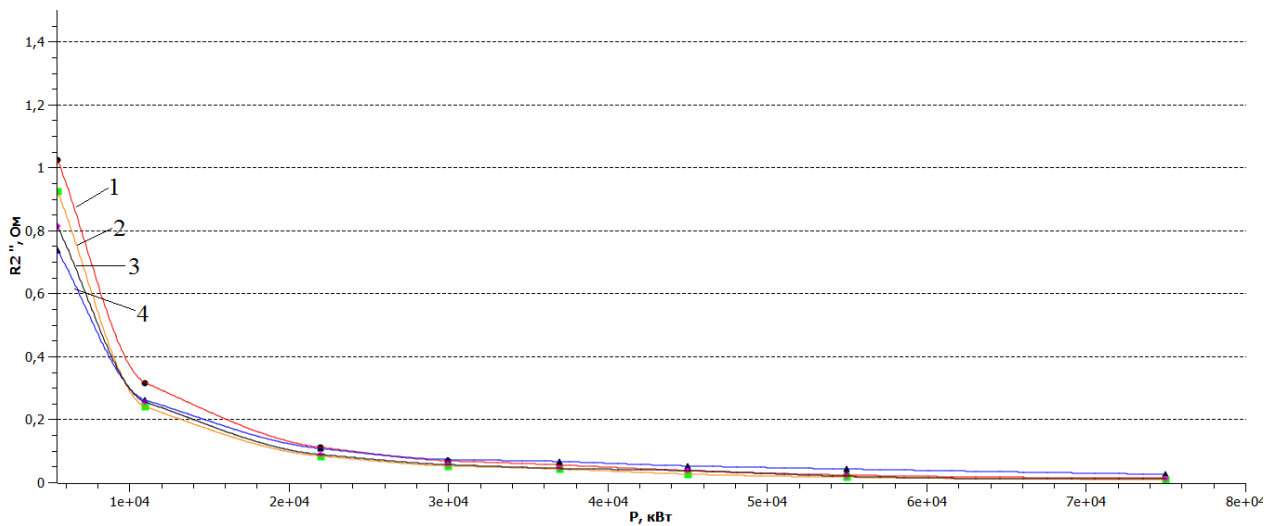


Рис. 10. Активное сопротивление ротора

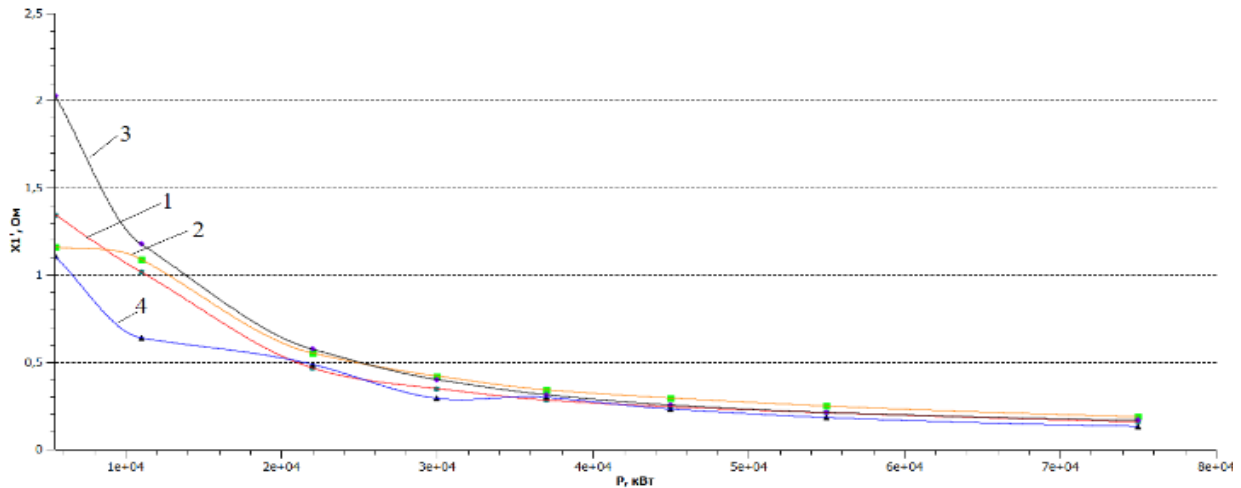


Рис. 11. Индуктивное сопротивление рассеяния статора

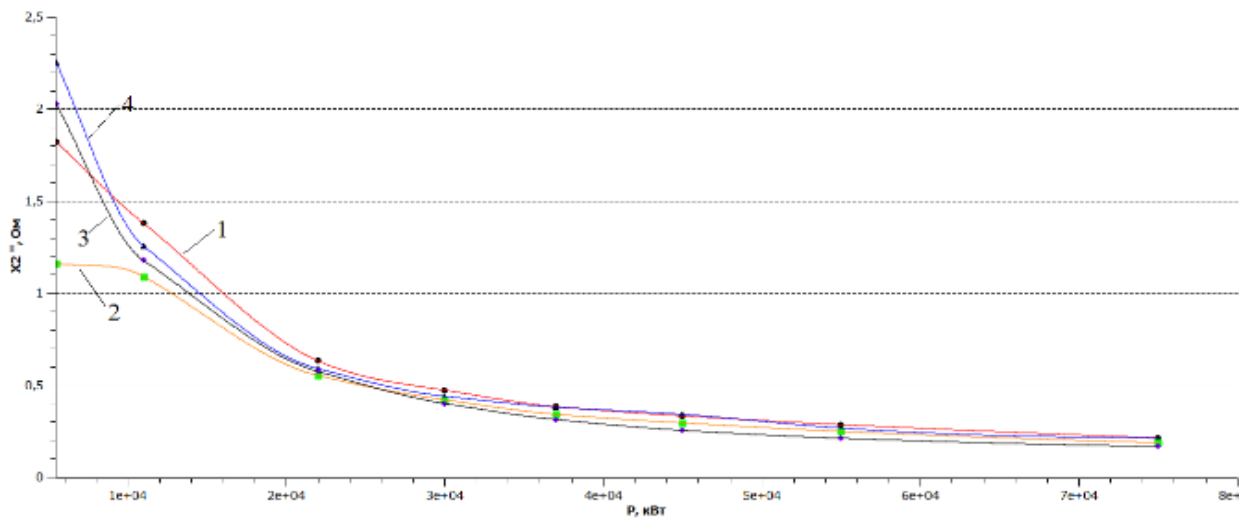


Рис. 12. Индуктивное сопротивление рассеяния ротора

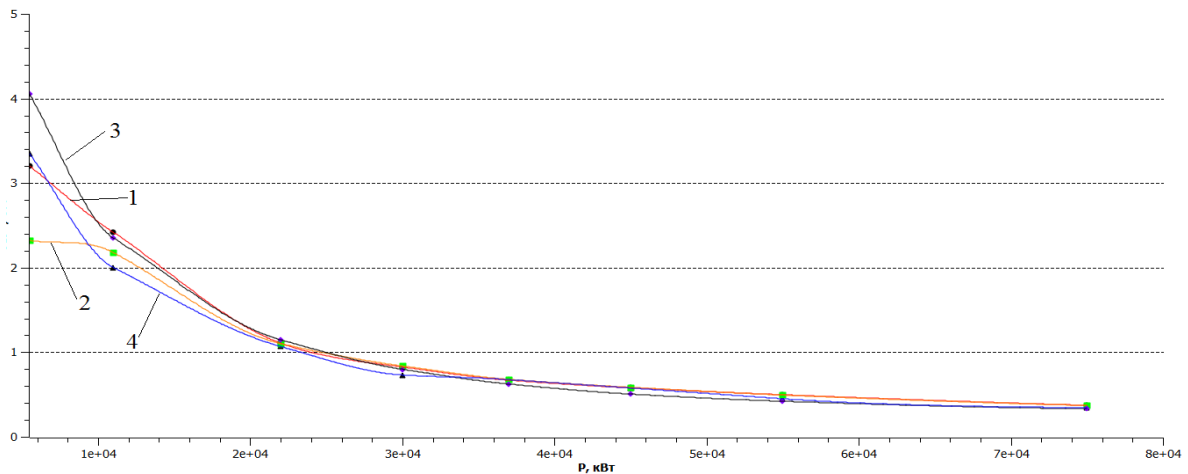


Рис. 13. Индуктивное сопротивление короткого замыкания

На приведенных рисунках 4-13 под номером 1 представлены зависимости, полученные с использованием аналитического метода расчета. Под номером 2 – обычного итерационного метода, реализованного в программе Dvigatel. Зависимости под номером 3 – получены итерационным методом, учитывающим эффект

вытеснения тока в роторе, реализованного в программе Dvigatel 2, и последние зависимости под номером 4 – данные о параметрах двигателей, взятые из справочника.

Для построения естественных статических механических характеристик АД было

использовано уравнение механической статической механической характеристики. [12]

$$M = \frac{3 \cdot U^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\omega_0 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_k)^2 \right]} \quad (5)$$

Критическое скольжение, определялось по параметрам статорной и роторной цепи АД

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \quad (6)$$

Знак плюс в выражении (6) соответствует двигательному режиму, а минус – генераторному.

В качестве характерных точек рассматривались точки естественной

статической механической характеристики получаемые при номинальном, критическом и пусковом моментах. Также сравнивалась угловая скорость в критической точке естественной статической механической характеристики и при номинальной нагрузке, которые были определены по расчетным соотношениям (5), (6) и приведены в таблице 3.

На основе полученных данных были построены зависимости моментов (пускового, критического и номинального) в относительных единицах от мощности АД, представленные на рисунках 14, 15 и 16 соответственно. Зависимости скорости вращения вала двигателя (критической и номинальной) представлены на рисунках 17, 18.

Таблица 3

Контрольные точки естественной механической характеристики АД

Тип двигателя	Методики	$M_n, \text{Н}\cdot\text{м}$	$M_k, \text{Н}\cdot\text{м}$	$M_n, \text{Н}\cdot\text{м}$	$n_n, \text{об/мин}$	$n_k, \text{об/мин}$
1	2	3	4	5	6	7
АИР56А2 (P = 180 Вт)	Аналит. метод.	0,648	1,62	1,354	2700	1587
	Dvigatel	0,677	0,927	0,555	2700	2265
	Dvigatel 2	0,639	0,835	1,336	2700	2344
	Каталожные парам.	0,637	1,128	1,284	2700	1896
АИР80А2 (P = 1,5 кВт)	Аналит. метод.	5,175	11,182	4,114	2880	2480
	Dvigatel	4,956	9,38	4,957	2880	2400
	Dvigatel 2	4,773	8,378	10,939	2880	2613
	Каталожные парам.	4,976	9,213	9,564	2880	2490
АИР100L2 (P = 5,5 кВт)	Аналит. метод.	19,085	46,416	19,014	2848	2453
	Dvigatel	18,107	26,19	9,101	2851	2643
	Dvigatel 2	18,049	45,211	38,691	2850,34	2650
	Каталожные парам.	18,438	44,858	23,094	2850,96	2447
АИР132М2 (P = 11кВт)	Аналит. метод.	37,251	73,516	21,006	2912	2630
	Dvigatel	33,119	41,733	9,726	2910,5	2775
	Dvigatel 2	34,143	68,207	57,733	2909	2695
	Каталожные парам.	36,115	77,48	29,898	2910	2694
АИР180S2 (P = 22 кВт)	Аналит. метод.	73,659	167,234	37,054	2940,23	2712
	Dvigatel	65,843	85,099	14,226	2940,5	2843
	Dvigatel 2	68,77	155,23	142,851	2941	2782
	Каталожные парам.	71,494	175,459	40,325	2940	2723
АИР180М2 (P = 30 кВт)	Аналит. метод.	99,517	226,441	42,754	2952,25	2777
	Dvigatel	87,382	112,571	15,75	2949	2830
	Dvigatel 2	113,669	212,853	194,196	2950,1	2780
	Каталожные парам.	99,114	241,499	58,409	2948,28	2760
АИР200М2 (P = 37 кВт)	Аналит. метод.	122,738	279,125	53,231	2951,67	2757
	Dvigatel	107,99	138,872	19,369	2947,5	2871
	Dvigatel 2	120,49	277,35	239,51	2949,7	2802
	Каталожные парам.	108	300,142	63,632	2952,48	2706

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
АИР200L2 (P = 45 кВт)	Аналит. метод.	148,693	338,206	49,188	2960,54	2811
	Dvigatel	132,429	162,14	16,575	2958,49	2907
	Dvigatel 2	140,212	332,645	290,1	2960	2838
	Каталожные парам.	111,008	352,257	71,187	2960	2733
АИР225М2 (P = 55 кВт)	Аналит. метод.	182,998	413,531	42,301	2968	2862
	Dvigatel	158,974	192,102	14,471	2971	2932
	Dvigatel 2	171,563	436,87	353,491	2970	2870
	Каталожные парам.	176,93	410,855	84,654	2970	2751
АИР250S2 (P = 75 кВт)	Аналит. метод.	243,147	563,516	46,887	2976	2887
	Dvigatel	214,164	257,362	16,306	2977	2943
	Dvigatel 2	228,64	567	481,226	2975	2895
	Каталожные парам.	240,861	576,768	118,481	2975	2752

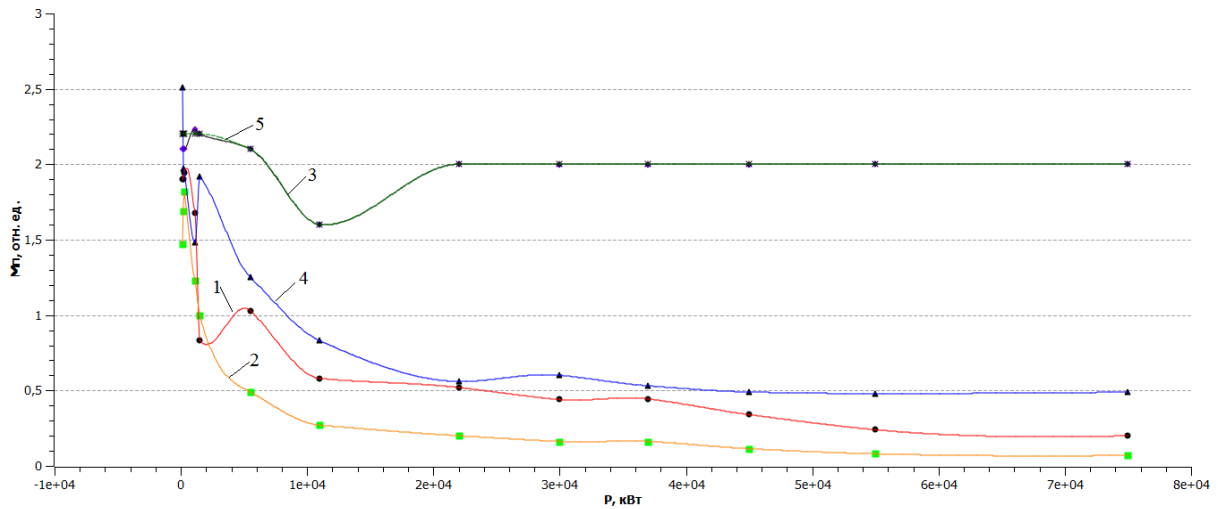


Рис. 14. Пусковые моменты двигателя в отн. ед.

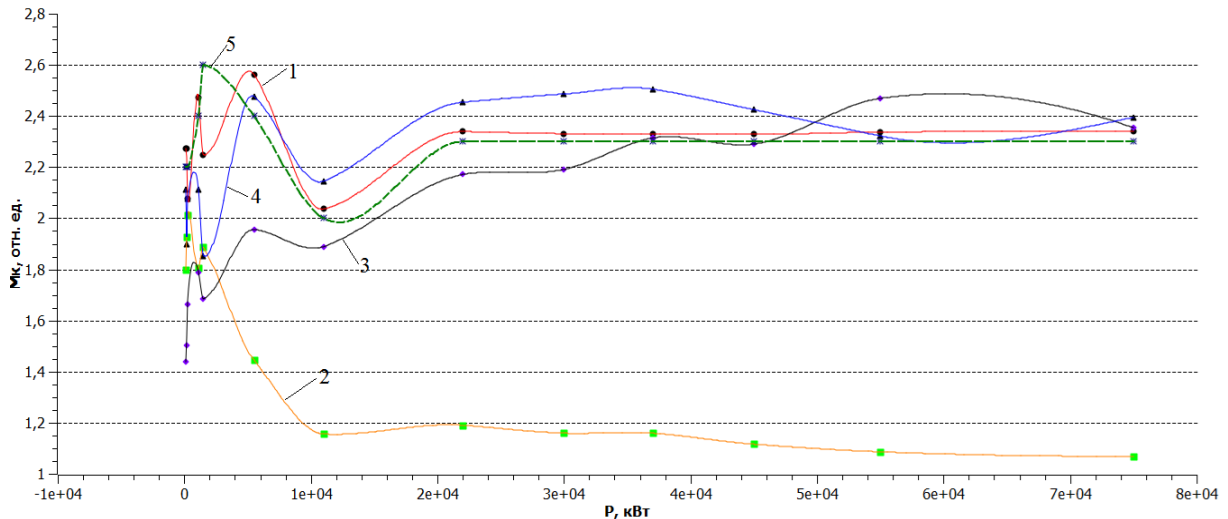


Рис. 15. Критические моменты двигателя в отн. ед.

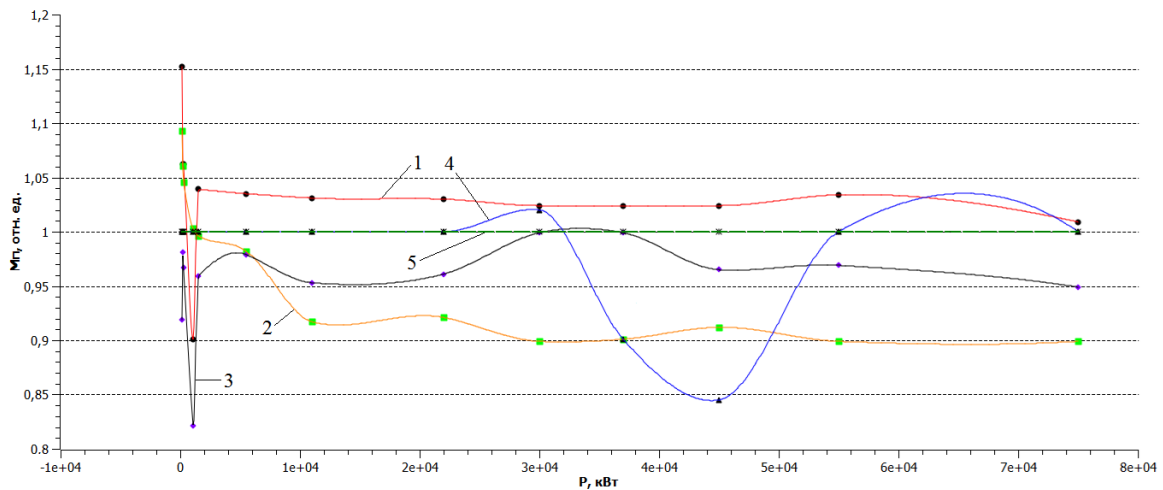


Рис. 16. Номинальные моменты двигателя в отн. ед.

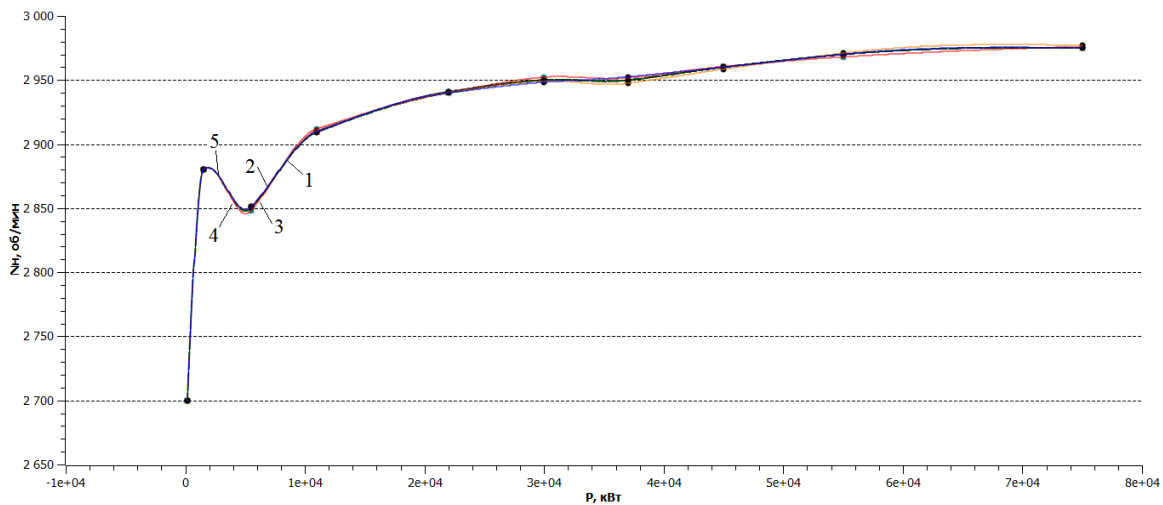


Рис. 17. Номинальная скорость вращения вала двигателя

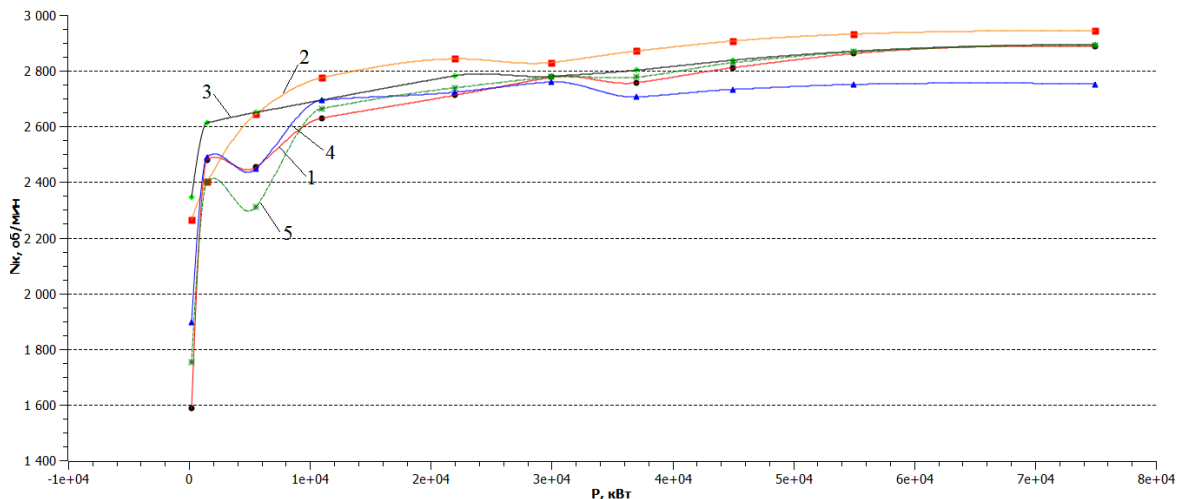


Рис. 18. Критическая скорость вращения вала двигателя

На рисунках были приняты следующие условные обозначения:

1 – зависимости моментов и угловых скоростей в диапазоне рассматриваемых мощностей АД от 180 Вт – 75 кВт, определенные аналитическим методом;

2 – аналогичные зависимости, полученные с использованием обычного итерационного метода реализованного в программе Dvigel; 3 – аналогичные зависимости полученные с использованием итерационного метода,

учитывающего эффект вытеснения тока в роторе реализованного в программе Dvigel 2;

4 – аналогічні залежності, отримані по параметрам, взятим із справочної літератури;

5 – аналогічні залежності, отримані по паспортним або каталожним даним АД.

Для отриманих залежностей моментів – номінального, критичного і пускового, а також швидкостей обертання двигателів в критичній і номінальній точках, були визначені відносні похибки (в відсотках).

Об'єкне розрахункове співвідношення для визначення відносної похибки в відсотках відповідно:

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad (7)$$

Розрахункове співвідношення (7) для визначення відносної похибки пускових, критичних і номінальних моментів примет наступний вигляд:

$$\delta_M = \frac{\Delta M}{M} \cdot 100\% \quad (8)$$

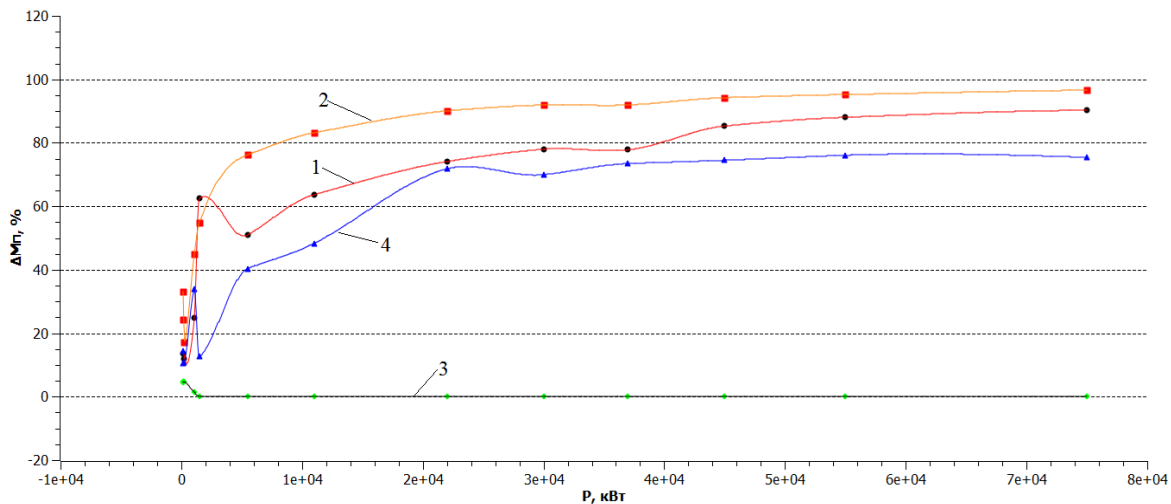


Рис. 19. Відносна похибка пускових моментів двигателів

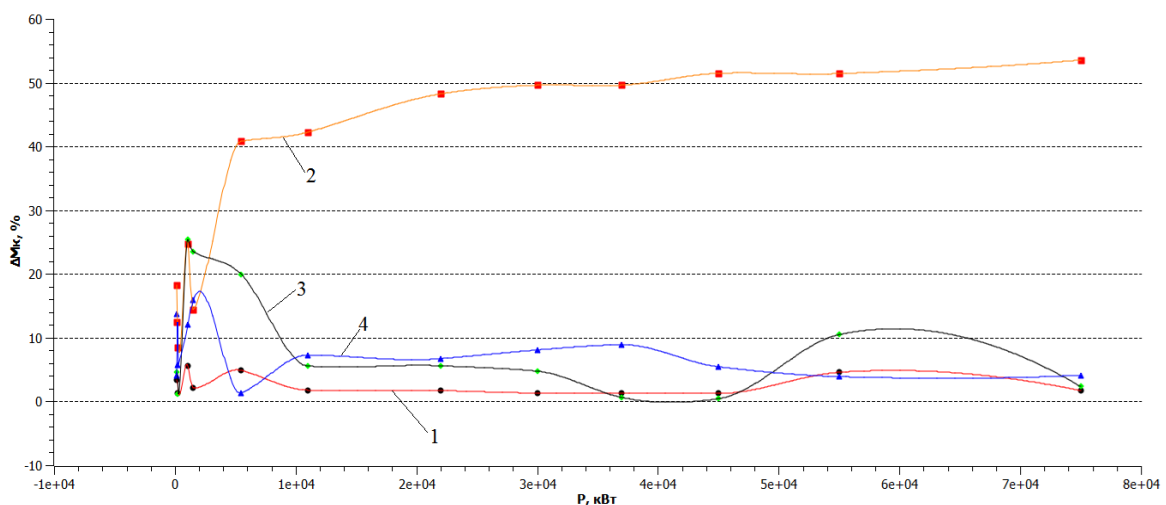


Рис. 20. Відносна похибка критичних моментів двигателів

де ΔM – похибка розрахункових значень моментів (пускових, критичних і номінальних). M – паспортне значення моменту (пускового, критичного і номінального).

Відносні похибки швидкостей обертання вала двигателів (в номінальних і критичних точках) були визначені аналогічно по наступному рівнянню:

$$\delta_n = \frac{\Delta n}{n} \cdot 100\% \quad (9)$$

де, Δn – абсолютна похибка розрахункових значень швидкостей обертання вала двигателів (в критичних і номінальних точках), n – паспортні значення швидкостей обертання вала двигателів (в критичних і номінальних точках).

Всі визначені похибки представлені в вигляді залежностей на рисунках 19 – 23.

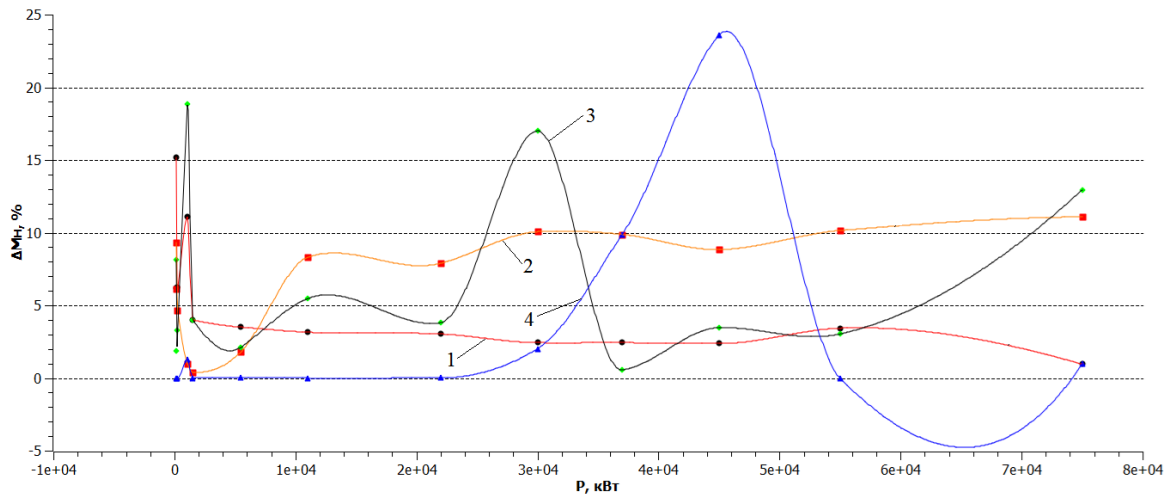


Рис. 21. Относительная ошибка номинальных моментов двигателя

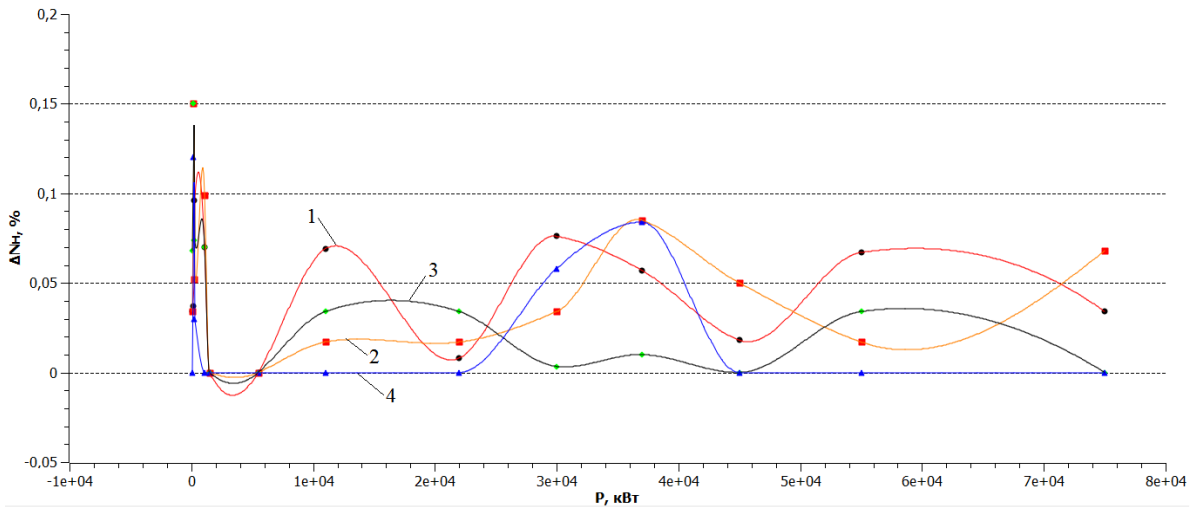


Рис. 22. Относительная ошибка номинальной угловой скорости двигателя

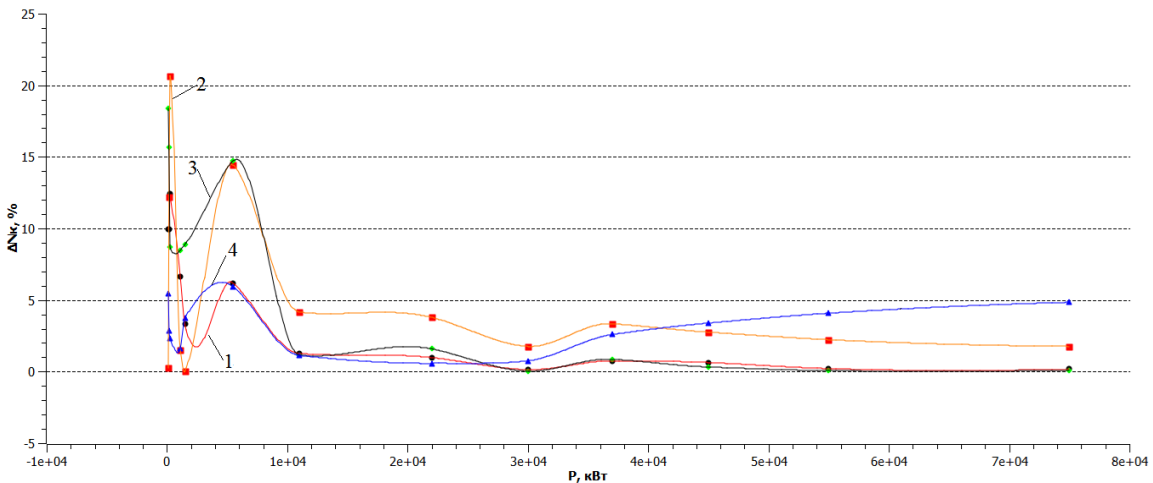


Рис. 23. Относительная погрешность критической угловой скорости

Из анализа приведенных выше зависимостей следует:

1. Погрешность методик в области пусковых моментов составляет более 60 %, за исключением методики Dvигatel 2, у которой погрешность практически отсутствует. Однако в отношении остальных методик прослеживается следующая закономерность - при увеличении

мощности электродвигателя, увеличивается погрешность в расчетах.

2. Из зависимости погрешностей для критических моментов можно видеть, что средняя ошибка для методик расчета параметров двигателя не превышает 10 %. Исключением из этого является методика Dvигatel, которая имеет наибольшую ошибку – более 40 %. Также

следует отметить, что данная методика имеет наибольшую погрешность и в области пусковых моментов. Наименьшую погрешность по данной зависимости имеет аналитическая методика – в среднем не более 5 %.

3. В области номинального момента самую минимальную ошибку имеет расчет по параметрам двигателя до мощности 22 кВт, далее погрешность достигает 20 % и более, затем опять снижается до 0. Аналитический метод также имеет небольшую погрешность, которая составляет не более 5 %. Наибольшую ошибку имеет программа Dvigate1 – 10 %.

4. В области номинальных скоростей, все методики имеют очень низкую погрешность в расчетах, которая составляет не более 0,15 %.

5. Анализ зависимостей критических скоростей показывает, что погрешность по всем методикам составляет не более 20 %. Самую низкую погрешность имеет аналитическая методика определения параметров двигателя – в среднем не более 5 %. Фактически такую же погрешность можно проследить и в зависимости определённой по параметрам двигателя, приведенным в справочной литературе. Остальные две методики (Dvigate1, Dvigate1 2) в нескольких точках, преимущественно при малых мощностях, имеют ошибку в расчетах более чем 10 %, затем входят в 5 % - ю зону, как две другие выше приведенные методики.

Выводы

Как показал выполненный в статье анализ – ни одна из рассмотренных методик не позволяет получать механическую характеристику, проходящую строго через все характерные точки, регламентируемые заводом изготовителем.

Для двигателей с высокими энергетическими показателями, мощностью более 20 кВт, получаемые значения фазных сопротивлений статорной и роторной цепей АД очень близки и не зависят от выбора метода их определения.

Для их определения достаточно упрощенной Г-образной схемы замещения и минимального набора данных, чтобы воспользоваться итерационной методикой.

Для двигателей малых мощностей (менее 20 кВт) с невысокими энергетическими показателями (η , $\cos\phi$), для определения их параметров уже необходимо рассмотрение Т-образной схемы замещения с учетом контура магнитной цепи. В этом случае, аналитические методы определения параметров остаются более действенными.

Для лучшей сходимости получаемых результатов с заводскими, необходимо учитывать эффект вытеснения тока в роторе. Его неучет ведет к большей погрешности получаемой естественной статической механической характеристике в области пусковой точки.

Итерационная методика с учётом эффекта вытеснения тока в роторе, даёт лучшую сходимость данных с паспортными в области пускового момента.

Несмотря на относительную сложность в определении параметров АД, аналитический метод также имеет минимальную ошибку, однако требует знания дополнительных сведений о двигателе, отсутствующих в паспортах или каталогах.

Для дальнейшего же увеличения сходимости получаемой статической механической характеристики двигателя с паспортными данными, необходимо также учитывать возможное изменение параметров фазных значений сопротивлений двигателя при различных режимах работы.

Таким образом, все рассмотренные методы определения параметров схемы замещения основываются на паспортных данных двигателя и если говорить о предельной точности расчета этих параметров, то пока самым действенным способом остаётся экспериментальный.

Список использованной литературы

1. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001 – 327 с.
2. Кравчик, А. Э. Асинхронные двигатели. Справочник [Текст] / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская; М.: Энергоатомиздат, 1982. – 380 с.
3. Квашнин, В. О. Исследования методик определения параметров однофазной эквивалентной схемы замещения асинхронного двигателя [Текст] / Квашнин В. О., Косенко В. А.; Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Зб. нпр. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. –Х. : НТУ “ХПІ”.–2013.–№ 36 (1009).– 600 с., с.256–258.
4. Загирияк, М. В. Электрические машины Ч. 3. Асинхронные машины [Текст] / Загирияк М. В., Невзлин Б. И.; Учебное пособие. – К ІСДО:1996. 196с.
5. Мошинский, Ю. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным [Текст] /

Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кирякин А. А.; *Электричество*. – 1998. – № 4. – С. 39–42.

6. Квашнин, В. О. Разработка методики программного расчета и исследования статических механических характеристик асинхронного двигателя (в среде BORLAND DELPHI) [Текст] / Квашнин В. О., Бабаш А. В.; Вестник ДГТУ, Сборник научных трудов, Днепродзержинск ДГТУ 2009.

7. Квашнин, В. О. Разработка методики определения статических механических характеристик асинхронных двигателей с повышенным пусковым моментом [Текст] / Квашнин В. О.; Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», – Харків: НТУ «ХПІ», 2005, № 45. – С. 378–381.

8. Квашнин, В. О. Исследование влияния изменения индуктивного сопротивления роторной цепи на статические характеристики ад [Текст] / Квашнин В. О., Лазуткина Ю. А., Федченко М. Д.; Науковий Вісник «ДДМА». Зб.н.с. № 3 (24Е) – 2017. – 174 с., с.78–86.

9. Квашнин, В. О. Разработка динамической модели асинхронного двигателя [Текст] / Квашнин В. О.; Вісник: Східноукраїнського Національного університету: Науковий журнал: Луганськ. – 2006: Випуск № 1(95) – С.87–91.

10. Квашнин, В. О., Косенко В. А. Анализ построения динамической модели асинхронного двигателя на основе расчетных и каталожных данных [Текст] / Квашнин, В. О., Косенко В. А.; Электротехнические и компьютерные системы г. Одесса 2014, с. 241–244.

11. Miloje M. Kostić Equivalent circuit improvement method for induction motor efficiency [Electronic resource] / Miloje M. Kostić; Electrical Engineering Institute Nikola Tesla, Belgrade University, Serbia April 2012, pp. 31–42.

12. Boglietti, A. Computational Algorithms for induction motor equivalent circuit parameter determination—Part I [Electronic resource] /Boglietti A., Cavagnino A., Lazzari M.; IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no 9, September 2011.

13. Zhou, P. Finite Element analysis of induction motors based on computing detailed equivalent circuit parameters [Electronic resource] /Zhou P., Gilmore J., Badics Z., Cendes Z. IEEE Trans. on Magn., vol.34, no.5, September 1998.

References

1. Kopylov, I. P. (2001), “Mathematical modeling of electrical machines” [“Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin”], 3rd ed. Revised. and ext. – М.: Higher. wk, – 327.

2. Krawczyk, A. E., Shlaf, M. M., Afonin, V. I., Sobolevskaya, E. A. (1982), “Induction motors. Directory” [“Asinhronnie dvigateli. Spravochnik”], М.: Energoatomizdat. – 380 p.

3. Kvashnin, V. O., Kosenko, V. A. (2013), “Research methods for determining the parameters of a single-phase equivalent circuit of the induction motor replacement”, *News Natsionalnogo tehničnogo universitetu "KhPI". St. ex. Seriya: Problems of the automated electric drive. Teoriyai practice. –X* [“Visnik nacionalnogo texničnogo universitetu “HPI”. zb. npr. seriya: Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriya i praktika. – X”], NTU “KhPI”, № 36 (1009)–600, pp.256–258.

4. Zagirnyak, M. V., Nevzlin, B. I. (1996), “Electrical Machines Part 3. Asynchronous machines: Textbook” [“Elektricheskie Mashiny Ch. 3. Asinxronnye mashiny: Uchebnoe posobie”], К ISDO, 196p.

5. Moshchinskii, Y. A., Bespalov, V. J., Kiryakin, A. A. (1998), “Determination parameters of the scheme of substitution of an asynchronous machine by catalog data”, *Electricity* [“Opredelenie parametrov sxemy zameshheniya asinxronnoj mashiny po katalozhnym dannym”], *Electrichestvo* № 4. – pp. 39–42.

6. Kvashnin, V. O., Babash A. V. (2009), “Development of methods and software for calculating the study of static mechanical characteristics of the induction motor (in the environment BORLAND DELPHI)”, *Vestnik DSTU, Collection of Scientific Papers* [“Razrabotka metodiki programmnogo rascheta i issledovaniya statcheskix mexanicheskix xarakteristik asinxronnogo dvigatelya (v srede BORLAND DELPHI)”, *Vestnik DGTU, Sbornik nauchnyx trudov*] Dneprodzержinsk DGTU.

7. Kvashnin, V. O. (2005), “Development of methods for determining the static mechanical characteristics of asynchronous motors with high starting torque” *Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"* [“Razrabotka metodiki opredeleniya statcheskix mexanicheskix xarakteristik asinxronnyx dvigatelej s povyshennym puskovym momentom”], *Visnik Nacionalnogo Texničnogo Universitetu «Xarkivskij Politehniknij Institut»*] Kharkiv: NTU “KhPI» № 45, pp. 378–381.

8. Kvashnin, V. O., Lazutkina, Y. A., Fedchenko, M. D. (2017) “Investigation of the influence changes inductive resistance of the rotor circuit to static characteristics ad” [“Issledovaniye vliyaniya izmeneniya induktivnogo soprotivleniya rotornoy tsepi na statcheskiye harakteristiki ad”],

Naukovy Vestnik DSEA: Donetsk, Issue № 3(24E), pp.78–86.

9. Kvashnin, V. O. (2006) “Development of a dynamic model of an induction motor”, *News: East Ukrainian National University: Scientific journal* [“Razrabotka dinamicheskoy modeli asinxronnogo dvigatelya”, *Visnik sxidnoukraïnskogo nacionalnogo universitetu: naukovij zhurnal*] Lugansk, Issue № 1 (95), pp.87–91.

10. Kvashnin V. O., Kosenko, V. A. (2014) “Analysis of the construction of a dynamic model of induction motor based on the calculated and catalog data” *Electrical and Computer Systems* [“Analiz postroeniya dinamicheskoy modeli asinxronnogo dvigatelya na osnove raschetnyx i katalozhnyx

dannyx”, *Elektrotexnicheskie i kompyuternye sistemy*] Odessa, pp. 241–244.

11. Miloje, M. Kostić (2012) “Equivalent circuit improvement method for induction motor efficiency”, *Electrical Engineering Institute Nikola Tesla, Belgrade University, Serbia*, pp. 31–42.

12. Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M. (2011) “Computational Algorithms for induction motor equivalent circuit parameter determination” *Ind. Electron Part I IEEE*, vol. 58, no 9.

13. Zhou, P., Gilmore, J., Badics, Z., Cendes, Z.J., (1998) “Finite Element analysis of induction motors based on computing detailed equivalent circuit parameters” *IEEE Trans. on Magn*, vol.34, no.5.

ANALYSIS OF VALUE PARAMETERS OF ASYNCHRONOUS MOTORS, CERTAIN ANALYTICAL AND ITERATIVE METHODS

V. O. Kvashnin, V. A. Kosenko, V. V. Kvashnin
Donbass State Engineering Academy

Abstract. *When designing modern asynchronous electric drives, it is necessary to know not only the basic parameters of the electric motor (nominal speed, current, moment, etc.), but also the stator and rotor circuit winding parameters, which in most cases the manufacturer does not provide. The knowledge of these parameters (phase resistances of the stator and the rotor) is a necessity when creating a full-fledged model of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor. To determine these parameters, it is often necessary to use various analytical and iterative methods of calculation based on the equivalent circuit of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor. Since the knowledge of these parameters is an integral part in the construction and development of electric drive control systems, the purpose of this work is to analyze and compare the parameters of the electric motor determined by the above methods. The parameters of the stator and rotor windings were determined for ten selected asynchronous motors with a short-circuited rotor of the AIR series. Based on the data obtained, the dependence of the phase resistances of the stator and rotor windings as a function of power was constructed. The influence of the calculated motor parameters on the static and mechanical characteristics of an asynchronous motor with a squirrel cage rotor is determined; the results of these studies are presented in the form of graphs of torque on the motor shaft (start, rated load mode and maximum load) and angular speed (nominal and critical). Based on the data obtained, the relative error for all identified parameters of the asynchronous motor was determined and a comparative analysis of methods for determining the parameters of the equivalent circuit of the engine was carried out. On the basis of the analysis obtained, the efficiency was determined, the considered methods for determining the parameters of the stator and rotor circuits for squirrel-cage induction motors in the power range of 180-7500 W.*

Keywords: *asynchronous motor, replacement circuit, starting, critical and nominal moments, relative error.*

АНАЛІЗ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ВИЗНАЧЕНИХ АНАЛІТИЧНИМ ТА ІТЕРАЦІЙНИМИ МЕТОДАМИ

В. О. Квашнін, В. А. Косенко, В. В. Квашнін
Донбаська Державна Машинобудівна Академія

Анотація. *При проектуванні сучасних асинхронних електроприводів необхідно знати не тільки базові параметри електродвигуна (номінальна швидкість, струм, момент і т.д.), але і параметри обмотки статора і роторної ланцюгів, які в більшості випадків завод виробник не надає. Знання цих параметрів (фазні опори статора і ротора), є необхідністю при створенні повноцінної моделі*

асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Для визначення цих параметрів часто доводиться використовувати різні аналітичні та ітераційні методи розрахунку, засновані на схемі заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Оскільки знання цих параметрів є невід'ємною частиною в побудові і розробці систем керування електроприводом, метою даної роботи є аналіз і порівняння параметрів електродвигуна, визначених вищевказаними методами. Для десяти обраних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором серії АИР були визначені параметри обмотки статорного і роторного ланцюгів. На основі отриманих даних була побудована залежність фазних опорів статорної і роторної обмоток в функції від потужності. Визначено вплив розрахованих параметрів двигуна на статичні і механічні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, результати цих досліджень представлені в роботі у вигляді графіків моменту на валу двигуна (пуск, режим номінального навантаження і максимальне навантаження) і кутової швидкості (номінальна і критична). На основі отриманих даних була визначена відносна похибка для всіх виявлених параметрів асинхронного двигуна та проведено порівняльний аналіз методик визначення параметрів схеми заміщення двигуна. На основі отриманого аналізу була визначена ефективність, розглянутих методик визначення параметрів обмотки і роторної ланцюгів для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором в діапазоні потужностей 180-7500 Вт.

Ключові слова: асинхронний двигун, схема заміщення, пусковий, критичний і номінальний моменти, відносна похибка.

Получено 08.11.2018



Квашнин Валерий Олегович, кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры «Электромеханические системы автоматизации» Донбасской государственной машиностроительной академии. Ул. Шкадинова, 76, Краматорск, Украина, E-mail: v.kvashnin@ukr.net, тел. (0626) 41-68-93, +38 (050) 989-77-01

Valeriy Kvashnin, Candidate of Technical Sciences, Docent, Lecturer, Department of Electromechanical systems of automation and electric drive, Donbass State Engineering Academy, Shkadinova st., 76, Kramatorsk, Ukraine, E-mail: v.kvashnin@ukr.net, tel. (0626) 41-68-93, +38 (050) 989-77-01

ORCID ID: 0000-0001-8171-9794



Косенко Владислав Артурович, аспирант кафедры Электромеханические системы автоматизации и электропривод Донбасской государственной машиностроительной академии. Ул. Шкадинова, 76, Краматорск, Украина, E-mail: kosenko281@gmail.com, тел. (0626) 41-68-93, +38 (099) 709-57-84

Vladislav Kosenko, graduate student Electromechanical automation systems and electric drive, Donbass State Engineering Academy, Shkadinova st., 76, Kramatorsk, Ukraine, E-mail: kosenko281@gmail.com, tel. (0626) 41-68-93, +38 (099) 709-57-84

ORCID ID: 0000-0003-3945-3253



Квашнин Владислав Валериевич, аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донбасской государственной машиностроительной академии, ул. Шкадинова, 76, Краматорск, Украина, E-mail: kvashnin.vladyslav@gmail.com, тел. (0626) 41-68-93, 0666843123

Kvashnin Vladislav, post graduate student Department of Automation Industrial Processes, Donbass State Engineering Academy, Shkadinova st., 76, Kramatorsk, Ukraine, E-mail: kvashnin.vladyslav@gmail.com, tel. (0626) 41-68-93, 0666843123

ORCID ID: 0000-0002-1730-1403