

УДК 621.313

Квашнин В. О., Бабаш А. В.

АНАЛИЗ ЕСТЕСТВЕННЫХ СТАТИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ФАЗНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

При разработке динамических моделей асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором необходимо знание параметров сопротивлений роторной и статорной цепей двигателя. Их значения, как правило, отсутствуют в большинстве каталогов, справочной литературе, а также их нет и в паспортах на асинхронные двигатели. Для определения недостающих параметров в литературных источниках приводятся описания разных методик [1–5], способных решить эту проблему. Исследование известных методик определения параметров однофазных эквивалентных схем замещения АД по (Т- и Г-образным схемам), а также анализ их влияния на точность статических характеристик двигателя описаны в [6, 7].

При этом оценка полученных результатов осуществлялась по степени точности совпадения получаемых статических характеристик двигателя в области характерных точек (пусковой, критической и номинальной) в сравнении с паспортными значениями.

Однако для некоторых двигателей значения сопротивлений роторной и статорной цепей изначально известны и приводятся вместе с исходными данными [8, 9]. К тому же как уже отмечалось в [7] при составлении рассмотренных методик их оценку следует проводить в сравнении с методиками определения параметров однофазной эквивалентной схемы замещения, учитывающих хотя бы эффект вытеснения тока в роторе в переходных режимах работы двигателя.

Таким образом, целесообразно проведение исследования оригинальных методик определения значений сопротивлений статорной и роторной цепей для отобранной группы асинхронных двигателей (табл. 1), у которых значения фазных сопротивлений известны и задаются вместе с паспортными данными [8, 9].

Исходные данные асинхронных электродвигателей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Паспортные данные асинхронных двигателей серии 4А 3000 об/мин

Типоразмер двигателя	P_n , кВт	n_n , об/мин	η_n , %	$\cos \varphi_n$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{M_k}{M_{ном}}$	R_1 , Ом	x_1 , Ом	R'_2 , Ом	x'_2 , Ом
$U_n = 380 \text{ В}, n_0 = 3000 \text{ об / мин}$										
4А100L2	5.5	2898	87.5	0.91	2	2.5	1	1.1	0.75	2.3
4А112М2	7.5	2925	87.5	0.88	2	2.8	0.68	0.85	0.41	2.1
4А132М2	11	2931	88	0.9	1.7	2.8	0.41	0.63	0.26	1.24
4А160S2	15	2937	88	0.91	1.4	2.2	0.4	0.7	0.17	0.93
4А160М2	18	2937	88.5	0.92	1.4	2.2	0.31	0.89	0.14	0.74
4А180S2	22	2943	88.5	0.91	1.4	2.5	0.21	0.48	0.12	0.58

Для сравнительной оценки получаемых естественных статических характеристик рассматриваемых двигателей (табл. 1), через уравнение (1) механической характеристики использующей значения фазных сопротивлений, рассмотрены три методики.

$$M = \frac{3 \cdot U^2 r_2' / S}{\omega_0 \left[(r_1 + r_2' / S)^2 + x_K^2 \right]} \quad (1)$$

Первая методика аналитического определения параметров Т-образной схемы замещения АД, реализована в программе STATIC. Подробное ее описание приведено в [3]. Вторая – определение фазных значений сопротивлений АД с использованием Г-образной схемы замещения методом последовательных итераций, которая реализована в программе DVIGATEL. Описание этой методики приведено в [4]. Третья методика – определение параметров упрощенной Г-образной схемы замещения АД с учетом эффекта вытеснения тока в роторе, реализована в программе DVIGATEL2 [10]. По своей сути она также является итерационной методикой и представляет собой дальнейшее логическое развитие второй методики DVIGATEL.

Краткое описание методики расчета параметров схемы замещения с учетом эффекта вытеснения тока в роторе.

Схема замещения с учетом вытеснения тока в роторе (преобразованная и упрощенная расчетная) представлена на рис. 1.

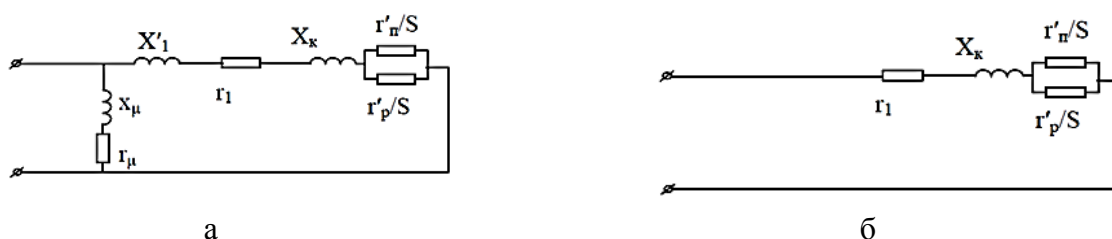


Рис. 1. Однофазная эквивалентная схема замещения АД:
а – преобразованная; б – упрощенная расчетная

Весь алгоритм для определения параметров АД по паспортным данным и построения его механических характеристик («рабочей», «пусковой» и «суммарной») представлен на рис. 2.

В блок-схеме алгоритма расчетов и построения механической характеристики АД выполняются следующие действия:

Ввод всех исходных расчетных параметров электродвигателя – $P_H, I_H, \eta_H, \cos\phi_H, U_{лн},$

$$S_H, n_0, \lambda_{\Pi} \left(\frac{M_{\Pi}}{M_H} \right), \lambda_K \left(\frac{M_K}{M_H} \right), \frac{I_{\Pi}}{I_H}.$$

Первый этап итераций определение X_K и r_{2P} :

- Определение характеристики $M_p(S)$;
- Определение $r_{2П}, R_{22}$;
- Определение $M_{п}(S)$ и $M(S)$ т. е. M2 и M3.

Второй этап итераций:

- Корректировка $r_{2П}$ по номинальной точке механической характеристики $M_H(S)$;
- Определение скорректированных пусковой $M_{п}(S) – M4$, и рабочей $M_p(S) – M5$ и результирующей $M(S) = M_{п}(S) + M_p(S)$ механических характеристик – M6.

Третий этап итераций:

- По найденным значениям M_K и S_K осуществляется корректировка $r_2' – R_2$ и X_K , расчет $M_p(S) – M7, M_{п}(S)$ и искомой $M(S)$ механических характеристик.

Основные расчетные соотношения методики с учетом вытеснения тока в роторе имеют следующий вид (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} I_H = \frac{U}{Z_H}; \\ \cos \varphi_H = \frac{r_1 + r_2' / S_H}{Z_H}; \\ \eta_H = \frac{2(1 - S_H)}{2 + \alpha S_H}. \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Z_H = \frac{U}{I_H}; \\ r_1 = \frac{Z_H \cos \varphi_H}{\eta_H}; r_2' = \frac{\eta_H S_H}{1 - S_H - \eta_H}; \\ X_K = \frac{U}{I_{II}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

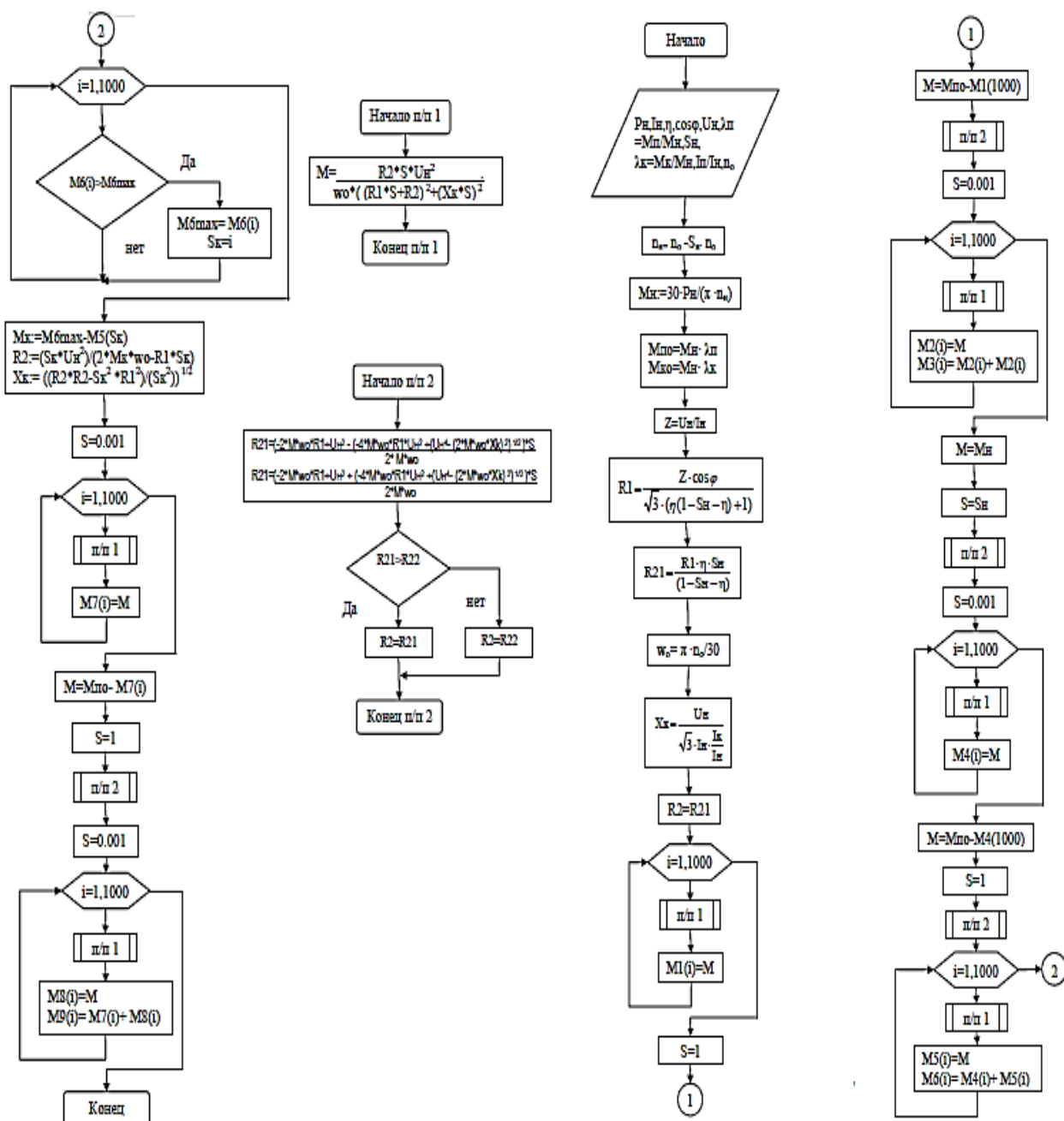


Рис. 2. Алгоритм методики учитывающей вытеснение тока в роторе асинхронного электродвигателя

Определение параметров схемы замещения для различных методик и построение статических характеристик асинхронных электродвигателей серии 4А.

Результаты определения фазных сопротивлений по указанным методикам и значения их исходных величин по паспортным данным (табл. 1) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Таблица параметров схемы замещения, найденным по различным методикам

Типоразмер двигателя (3000 об/мин)	Результаты расчета параметров схемы замещения АД по различным методикам				
	Параметры схемы замещения [размерность]	По методике Dvigate12 с вытеснением тока в роторе	По методике Static	По методике Dvigate1	По параметрам схемы замещения
4A100L2	$R_1, \text{ Ом}$	1,791	0,40	3,184	1
	$R_2 (R_{\text{пущк}}) \text{ Ом}$	1,25(20,03)	0,540	0,640	0,75
	$X_k, \text{ Ом}$	4,8	4,74	2,543	3,4
4A112M2	$R_1, \text{ Ом}$	1,342	0,223	2,010	0,68
	$R_2 (R_{\text{пущк}}) \text{ Ом}$	0,694 (11,68)	0,370	0,367	0,41
	$X_k, \text{ Ом}$	3,504	3,4	1,480	2,95
4A132M2	$R_1, \text{ Ом}$	0,932	0,1424	1,226	0,41
	$R_2 (R_{\text{пущк}}) \text{ Ом}$	0,418 (10,164)	0,2657	0,237	0,26
	$X_k, \text{ Ом}$	2,44	2,38	0,584	1,87
4A160S2	$R_1, \text{ Ом}$	0,711	0,097	1,437	0,4
	$R_2 (R_{\text{пущк}}) \text{ Ом}$	0,271(9,86)	0,198	0,137	0,17
	$X_k, \text{ Ом}$	1,831	1,764	1,246	1,63
4A160M2	$R_1, \text{ Ом}$	0,5785	0,0815	1,198	0,31
	$R_2 (R_{\text{пущк}}) \text{ Ом}$	0,225 (8,300)	0,17	0,1139	0,14
	$X_k, \text{ Ом}$	1,521	1,50	1,038	1,63
4A180S2	$R_1, \text{ Ом}$	0,472	0,061	0,768	0,21
	$R_2 (R_{\text{пущк}}) \text{ Ом}$	0,167(6,405)	0,136	0,093	0,12
	$X_k, \text{ Ом}$	1,236	1,212	0,560	1,06

Их сопоставительный анализ показывает, что получаемые значения фазных сопротивлений по всем трем методикам плохо согласуются с заданными аналогичными величинами, приведенными в исходных данных. А сопротивления роторной цепи для рассматриваемых двигателей, определенных по последней третьей методике вообще являются непостоянными.

В результате расчетов и построений для каждого двигателя серии 4А, из табл. 1 были получены разными методами четыре естественные статические механические характеристики. Характеристика 1 – по методике 1 с использованием программы Static. Характеристика 2 – на основе программы Dvigate1 (методика 2). Характеристика 3 – на основе программы Dvigate12 (методика 3). Характеристика 4 – с использованием табличных значений сопротивлений (табл. 1). На рис. 3 (а–е) приведены результаты расчетов и построений естественных статических механических характеристик для шести двигателей (табл. 1), с использованием паспортных значений фазных сопротивлений (табл. 1), а также найденных по трем рассматриваемым методикам (табл. 2). На рис. 3 нанесены характерные паспортные точки (“х” – номинальная точка, “□” – критическая точка, “+” – пусковая точка).

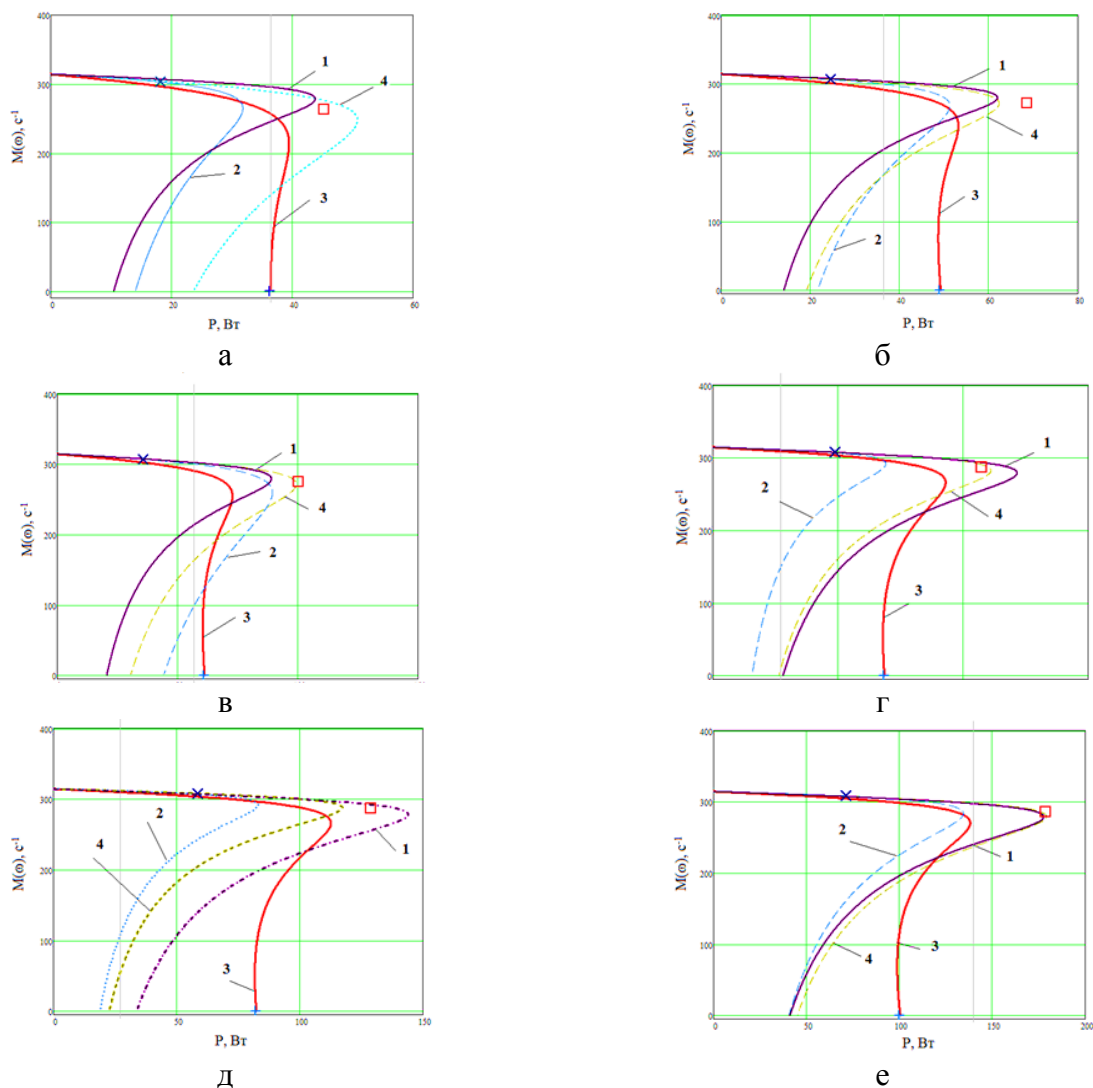


Рис. 3. Статические характеристики асинхронных электродвигателей серии 4А 3000 об/мин:

а – 4А100L2 5,5 кВт; б – 4А112М2 7,5 кВт; в – 4А132М2 11 кВт; г – 4А160S2 15 кВт; д – 4А160М2 18 кВт; е – 4А180S2 22 кВт

Сравнительный анализ статических механических характеристик.

Для оценки полученных статических механических характеристик на основе рассматриваемых методик и задаваемых табличных значений фазных сопротивлений, были определены соответствующие характерные точки – пусковая, критическая, номинальная (табл. 3).

Для полученных значений моментов и скоростей характерных точек из табл. 3 были построены зависимости номинального, критического и пускового моментов, а также угловых скоростей, полученных при номинальных моментах нагрузок, от номинальных мощностей двигателей, которые представлены на рис. 4 (а–в) и рис. 5 (а) соответственно. По полученным зависимостям были определены в процентах соответствующие погрешности, их отклонения от аналогичных их паспортных величин (табл. 4). По данным табл. 4 были построены графики изменений погрешностей для номинального, критического и пускового моментов (рис. 4, г–е), а также для номинальной скорости (рис. 5, б) в зависимости от мощностей двигателя. На рис. 6 (а–в) представлены в относительных единицах зависимости для номинального, критического и пускового моментов в зависимости от мощностей двигателей, получаемых на основе рассматриваемых методик (1–3) а также с использованием имеющихся табличных значений фазных сопротивлений двигателей.

Таблица 3

Сравнительный анализ характерных точек статических механических характеристик, определенных различными методами

Типоразмер двигателя (3000 об/мин)	Результаты расчетов естественных статических механических характеристик по различным методикам и табличным значениям фазных сопротивлений										
	Параметр (размерность) [с ⁻¹], [Н·м]	По методике Dvigatel2 с вытеснением тока в роторе		По методике Static		По методике Dvigatel		По паспортным данным		По табличным значениям фазных сопротивлений	
4A100L2	ω_H / M_H	296.88	18.12	306.62	18.12	303.79	18.12	303.47	18.12	303.16	18.12
	ω_K / M_K	214.57	39.47	279.29	43,83	264.84	31.84	262.85	45.30	245.67	50.84
	ω_Π / M_Π	0	36.44	0	10,5	0	14.02	0	36.25	0	23.71
4A112M2	ω_H / M_H	300.96	24.5	307.25	24.5	306.62	24.5	306.31	24.5	306.62	24.5
	ω_K / M_K	239.08	53.21	279.92	61.97	266.72	51.28	271.5	68.6	271.43	62.33
	ω_Π / M_Π	0	49.23	0	14.14	0	21.63	0	48.97	0	19.16
4A132M2	ω_H / M_H	302.22	35.84	307.25	35.84	306.93	35.84	306.93	35.84	306.93	35.84
	ω_K / M_K	253.84	72.85	279.29	89.16	260.12	89.46	275	100.4	270.81	99.41
	ω_Π / M_Π	0	61.24	0	20.7	0	44.2	0	60.93	0	30.46
4A160S2	ω_H / M_H	303.48	48.8	306.93	48.8	306.93	48.8	307.56	48.8	306.93	48.8
	ω_K / M_K	265.78	93.06	277.72	121.6	291.23	69.2	286.6	107.3	282.74	111.2
	ω_Π / M_Π	0	68.6	0	28.18	0	15.68	0	68.28	0	26.35
4A160M2	ω_H / M_H	302.72	58.53	308.68	58.53	307.68	58.53	307.56	58.53	308.68	58.53
	ω_K / M_K	265	112.57	276.91	144	291.8	82.57	286.72	128.76	287.14	117.33
	ω_Π / M_Π	0	81.94	0	33.77	0	18.81	0	81.935	0	22.63
4A180S2	ω_H / M_H	304.42	71.38	306.93	71.38	306.93	71.38	308.19	71.38	306,93	71.38
	ω_K / M_K	270.49	138.14	277.72	177.6	283.37	134.41	285.42	178.5	278.35	179.01
	ω_Π / M_Π	0	100.46	0	40.57	0	40.57	0	99.94	0	45

Таблица 4

Таблица относительных погрешностей

Типоразмер двигателя (3000 об/мин)	Результаты расчета относительных погрешностей характеристик по различным методикам								
	Относительная погрешность характерных точек, %	По методике Dvigatel2 с вытеснением тока в роторе		По методике Static		По методике Dvigatel		По параметрам схемы замещения	
4A100L2	$\Delta\omega_n, \Delta M_n$	2,17	36,31	1,04	40,0	0,11	7,89	0,1	0,22
	$\Delta\omega_k, \Delta M_k$	18,37	12,87	6,25	3,25	0,76	29,71	6,54	12,23
	$\Delta\omega_p, \Delta M_p$	-	0,52	-	71,03	-	61,32	-	34,6
4A112M2	$\Delta\omega_n, \Delta M_n$	1,75	35,02	0,31	0	0,1	0	0,1	2,04
	$\Delta\omega_k, \Delta M_k$	11,94	22,43	3,1	9,66	1,76	25,25	0,03	9,14
	$\Delta\omega_p, \Delta M_p$	-	0,53	-	71,13	-	55,83	-	60,87
4A132M2	$\Delta\omega_n, \Delta M_n$	1,53	33,87	0,1	0	0	0	0	0,17
	$\Delta\omega_k, \Delta M_k$	21,16	27,55	1,56	11,2	5,41	10,9	1,52	0,99
	$\Delta\omega_p, \Delta M_p$	-	0,51	-	66,03	-	27,46	-	50,01
4A160S2	$\Delta\omega_n, \Delta M_n$	1,33	33,26	0,2	0	0,2	0	0,2	0,41
	$\Delta\omega_k, \Delta M_k$	7,26	13,27	3,1	13,33	1,62	35,51	1,35	3,63
	$\Delta\omega_p, \Delta M_p$	-	0,47	-	58,73	-	77,04	-	61,41
4A160M2	$\Delta\omega_n, \Delta M_n$	1,57	32,84	0,36	0	0,039	0	0,364	0,22
	$\Delta\omega_k, \Delta M_k$	7,58	12,57	3,42	11,84	1,77	35,87	0,146	8,88
	$\Delta\omega_p, \Delta M_p$	-	0,006	-	58,78	-	77,04	-	72,38
4A180S2	$\Delta\omega_n, \Delta M_n$	1,22	32,78	0,41	0	0,13	0	0,41	0,17
	$\Delta\omega_k, \Delta M_k$	5,23	22,61	2,7	0,5	0,72	24,7	2,48	0,29
	$\Delta\omega_p, \Delta M_p$	-	0,52	-	59,41	-	59,41	-	54,97

Анализ полученных зависимостей моментов (пускового, критического и номинального), их отклонений, а также получаемых номинальных скоростей от мощности двигателя в области характерных точек статической механической характеристики АД, которые были получены на основе табличных значений фазных сопротивлений (табл. 2) использованием трех оригинальных методик указывает:

1. Погрешность для угловых скоростей соответствующих паспортным значениям номинальных моментов для рассмотренной группы двигателей не превышает 2 % во всех случаях (рис. 5, а, б).

2. Погрешность для моментов соответствующих табличным значениям номинальных скоростей, если исключить из рассмотрения самую минимальную мощность двигателя ($P_n = 5,5$ кВт), не превышает 5 % (рис. 4, а–е). Исключение составляет лишь третья методика определения параметров однофазной схемы замещения АД с учетом эффекта вытеснения тока в роторе. Для нее ошибка находится на уровне 35 %.

3. Погрешности для критического момента $M_k = f(P)$, определенного с использованием 1-й методики менее 15 %, для 2-ой методики находятся на уровне 10–40 %, для 3-ей методики составляют 10–30 %, а для определенных по табличным значениям фазных сопротивлений практически не превышают 10 % (рис. 4, г–е).

4. Погрешности пускового момента, определенные с использованием табличных значений фазных сопротивлений, а также 1-й и 2-й методик находятся в пределах 25–30 %. Исключение составляет 3-я методика, по которой получаемые пусковые моменты практически полностью совпадают с табличными значениями (рис. 4, а–г).

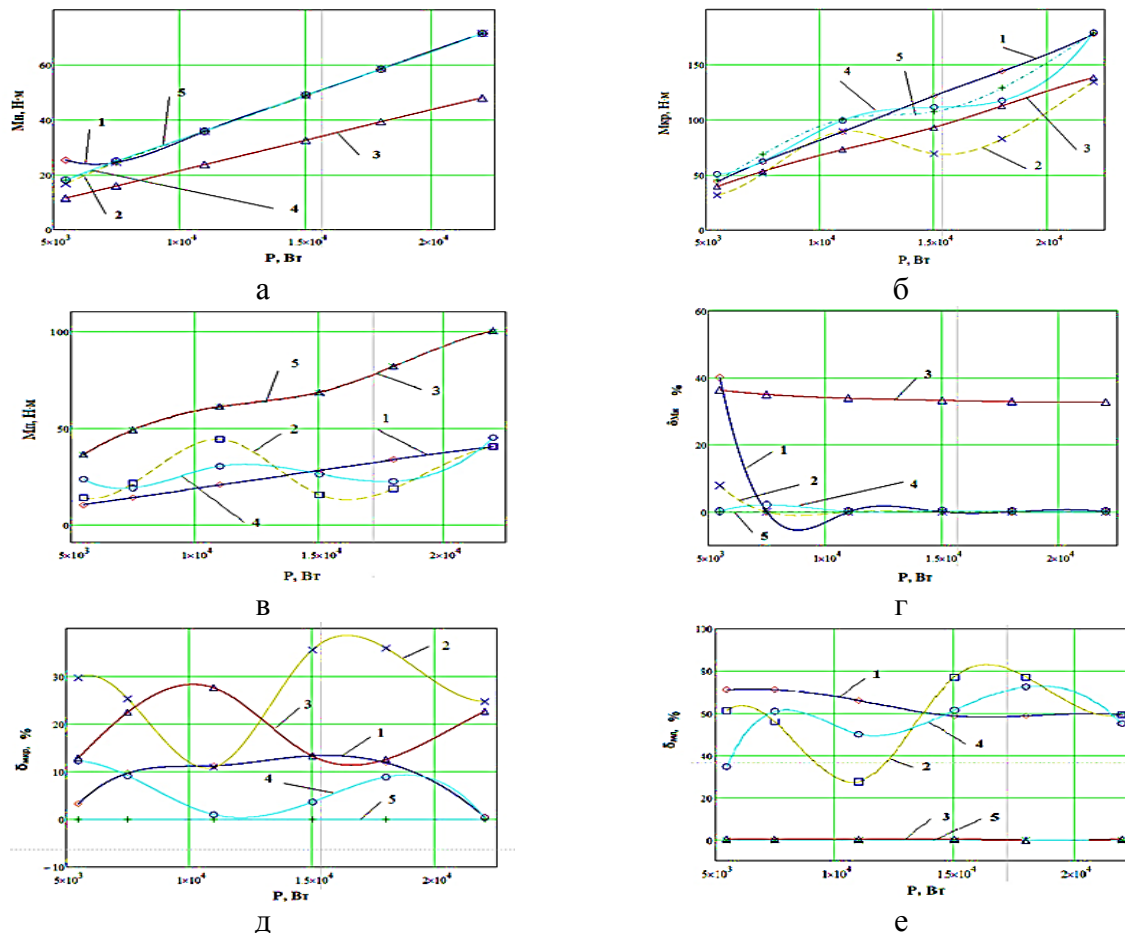


Рис. 4. Зависимости моментов и их погрешностей от мощности двигателя:

а – зависимость момента номинального от мощности двигателя; б – зависимость момента критического от мощности двигателя; в – зависимость момента пускового от мощности двигателя; г – зависимость погрешности номинального момента и мощности двигателя; д – зависимость погрешности критического момента и мощности двигателя; е – зависимость погрешности пускового момента и мощности двигателя

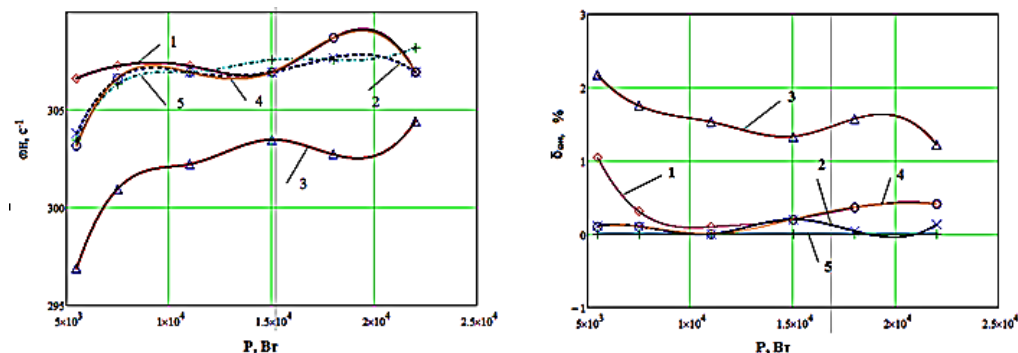


Рис. 5. Зависимости номинальной угловой скорости и ее погрешности от мощности двигателя:

а – зависимость номинальной угловой скорости от мощности двигателя; б – зависимость погрешности номинальной угловой скорости от мощности двигателя

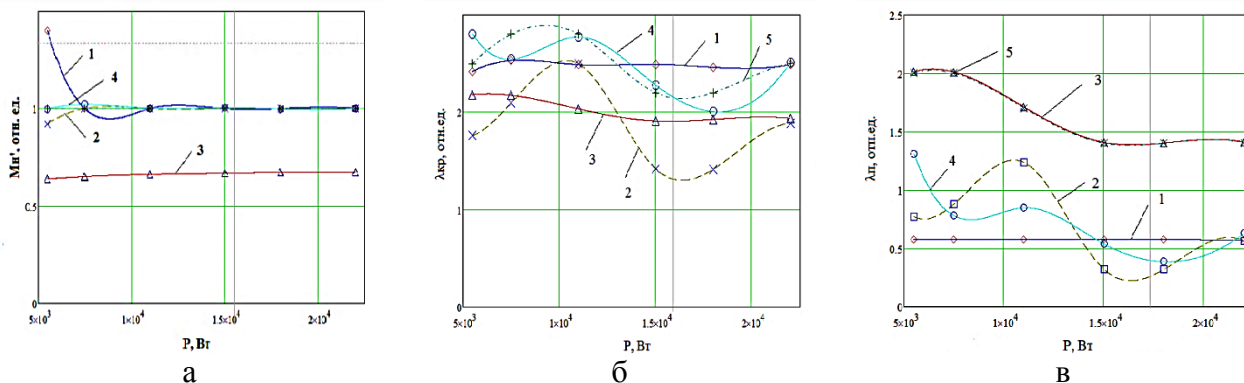


Рис. 6. Относительные зависимости моментов от мощности двигателя:

а – зависимость момента номинального от мощности двигателя в относительных единицах; б – зависимость момента критического от мощности двигателя в относительных единицах; в – зависимость момента пускового от мощности двигателя в относительных единицах

ВЫВОДЫ

Таким образом, несмотря на использование различных схем замещения в основе первых двух методик определения значений фазных сопротивлений двигателя, несовпадение получаемых статических механических характеристик в сравнении с аналогичными, полученными на основе табличных значений фазных сопротивлений в области характерных точек находится приблизительно на одном уровне

С другой стороны – третья методика, на основе эффекта вытеснения тока в роторе, позволяет точно определять пусковые моменты для всех рассмотренных двигателей, но при этом в области критической и номинальной точек значительно хуже (рис. 6, а–в). Т. е. для последней методики следует значительно расширить выборку рассматриваемых двигателей, либо в противном случае, она потребует доработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загирняк М. В. Электрические машины. Ч. 3. Асинхронные машины: учебное пособие / М. В. Загирняк, Б. И. Невзлин – К ИСДО. :1996. – 196 с.
2. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. учебное пособие / С. Г. Герман-Галкин – СПб. : Корона Принт, 2001. – 320 с., ил.
3. Квашин В. О. Разработка методики программного расчета и исследования статических механических характеристик асинхронного двигателя (в среде BORLAND DELPHI) / В. О. Квашин, А. В. Бабаиш // Вестник ДГТУ : сборник научных трудов. – Днепропетровск : ДГТУ, 2009.
4. Квашин В. О. Методика аналитического определения характеристик асинхронного двигателя / В. О. Квашин // Проблемы создания новых машин и технологий -Сборник научных трудов : Кременчугский государственный политехнический университет : КГПИ-2000. – Вып. – 1. – № 8. – С. 143–145.
5. Квашин В. О. Разработка методов и средств технической диагностики сложных электромеханических систем / В. О. Квашин // Праці Луганськ. Від. Міжн. академії інформ. : Науковий журнал. – № 2. – 2005. – С. 53–58.
6. Квашин В. О. Исследования методик определения параметров однофазной эквивалентной схемы замещения асинхронного двигателя // В. О. Квашин, В. А. Косенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : збірник наукових праць. – Серія : Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 36 (1009). – 600 с. – С. 256–258.
7. Квашин В. О. Анализ влияния различных методик определения параметров однофазных схем замещения асинхронного двигателя на точность его статических характеристик / В. О. Квашин, А. В. Бабаиш // Научное издание Электротехнические и компьютерные системы, Научно-технический журнал. – Киев Техника 2014, ISSN 2221–3805, С. 484.
8. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 380 с.
9. Огарь В. А. Уточнение характеристик асинхронных двигателей с учетом изменения их параметров в пусковых режимах / В. А. Огарь, А. П. Калинов // Вісник КДПУ. – Випуск 3/2006 (39). – Частина 1. – С. 45–49.
10. Квашин В. О. Разработка методики определения статических механических характеристик асинхронных двигателей с повышенным пусковым моментом / В. О. Квашин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – № 45. – С. 378–381.

Статья поступила в редакцию 24.12.2014 г.