

Поступила в редакцию 23.09.2020

DOI 10.46960/2658-6754_2020_3_53

УДК 621.313.3

**А.Ю. Смирнов^{1,2,3}, Е.Н. Александрова¹,
Т.Н. Уснунц-Кригер³**

ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ПАСПОРТНЫМ ДАННЫМ

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

² «Опытное конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова»
Нижний Новгород, Россия

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Выкса, Нижегородская область, Россия

Описана методика построения механических характеристик асинхронных двигателей с использованием номинальных данных серийных двигателей в качестве экспериментальных результатов и формулы Клосса, предназначенная для исследования работы электроприводов на их основе. Методика опробована при проведении дистанционного обучения студентов в рамках курсов «Электрические машины» и «Электропривод» построения механической характеристики по точкам.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, механическая характеристика, скольжение, кратность максимального момента, формула Клосса, электромагнитный момент.

I. Введение

В связи с широким внедрением частотных преобразователей для регулирования скорости вращения асинхронных двигателей возникает необходимость оперативной оценки характеристик электропривода на их основе. Такая оценка, важная при многократном изменении параметров преобразователя посредством контроллера, может быть выполнена по механической характеристике, пересчитанной по ее паспортным данным, с использованием формулы Клосса для определения точек характеристики и круговой диаграмме машины.

Для исследования механических характеристик асинхронных двигателей в качестве экспериментальных результатов использованы паспортные данные серийных асинхронных двигателей фирмы Siemens.

II. Материалы и методы

Выражение для определения механической характеристики [1]:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2'}{s \cdot \omega \cdot \left[\left(r_1 + C_1 \cdot \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + C_1 \cdot X_2')^2 \right]}, \quad (1)$$

достаточно громоздкое и неудобное для приблизительных расчётов. Здесь m_1 – число фаз, U_1 – напряжение сети, r_2' и X_2' – активное и индуктивное сопротивление вторичной цепи (цепи ротора), приведённые к сопротивлению первичной (цепи статора); s – скольжение, ω – круговая частота напряжения сети, r_1 , X_1 – активное и индуктивное сопротивления обмотки статора, C_1 – коэффициент приведения Т-образной схемы замещения к Г-образной [1-5].

На практике используется более простая формула (формула Клосса), в которой не учитывается падение напряжения в статоре:

$$\frac{M}{M_{\max}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (2)$$

По этой формуле механическая характеристика $M = f(s)$ может быть построена с погрешностью 10-15 %, если для каких-либо двух режимов известны момент M и скольжение s . Этими двумя режимами могут быть номинальный режим и режим пуска, хотя влияние вытеснения тока и высших гармоник накладывает погрешности на показатели последнего. Наиболее сильно влиянию указанных факторов подвержены двухклеточные и глубоководные двигатели, а также с небольшим числом пазов на полюс и фазу: многополюсные и малой мощности. Поэтому вместо пускового целесообразнее использовать параметры режима работы на критическом скольжении. Необходимые данные приводятся в каталогах в виде номинальной частоты вращения и кратности максимального момента:

$$K_M = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{ном}}$ – номинальный момент двигателя. В современных двигателях общепромышленного применения кратность максимального момента K_M находится в пределах $1,7 \div 3,0$.

При построении механической характеристики первоначально следует определить критическое скольжение:

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{1}{K_m} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (4)$$

Подставив в (4) $M = M_{\text{ном}}$ и $s = s_{\text{ном}}$, можно найти:

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \cdot \left(K_m + \sqrt{K_m^2 - 1} \right) \quad (5)$$

а затем рассчитать по точкам механическую характеристику двигателя, подставляя в формулу Клосса значения скольжения в диапазоне $0 \leq s \leq 1$. В диапазоне $0 < s < s_{\text{кр}}$ вычисления следует выполнять с меньшим шагом, поскольку этот участок является геометрическим местом значений момента асинхронного двигателя в установившемся режиме. Частота вращения на этом участке с ростом нагрузки уменьшается незначительно.

III. Курсовая работа по расчету механических характеристик асинхронных двигателей

Изложенный анализ с построением механических характеристик может быть интересен не только в техническом, но и в учебно-методическом аспекте. В связи с переходом на дистанционное обучение большую актуальность приобретает усвоение студентами лекционного материала, при котором нет подробного конспектирования слушателями, а основная часть информации передается в электронном виде. Практика дистанционного преподавания в НГТУ и в Выксунском филиале МИСиС показывает, что без детального разбора несложных, но интеллектуально емких задач в рамках курса с последующим самостоятельным их решением по вариантам такого усвоения лекционного материала достичь невозможно.

Задания на курсовую работу по расчету механических характеристик асинхронных двигателей фирмы Siemens по их паспортным данным представлены в табл. 1.

Порядок выполнения расчетов следующий.

1. Исходные данные.

Ротор – короткозамкнутый. Номинальные данные некоторых серийных образцов двигателей содержатся в таблице 1, где U_1 – напряжение (фазное) сети, В; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность, кВт; f – частота сети; $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток; $\cos\varphi_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент мощности; $n_{\text{ном}}$ –

номинальная частота вращения, об/мин; K_M – кратность максимального момента.

Таблица 1.

Задания для исследования асинхронного двигателя (по вариантам)

№	ФИО	U_1	$P_{ном}$	Гр. соед.	$\cos\varphi_{ном}$	$I_{ном}$	$n_{ном}$	K_M	Обозначение (типоразмер)
1		380	83	Δ	0,84	160	984	2,3	1LA4313-B3/5-315M
2		380	15	Δ	0,88	29	1460	2,9	1LA3166-4AA40
3		380	3,0	Δ	0,83	7,0	1410	2,7	1LA3107-4AA40
4		220	1,5	Δ	0,85	5,9	2855	2,5	1LA3096-4AA21
5		380	39	Δ	0,89	72	2960	2,3	1LA4223-B3-225M
6		380	315	Y	0,87	335	990	2,4	1LA4406-B3-400/2
7		220	2,2	Δ	0,85	8,3	2860	2,8	1LA3096-2AA20
8		220	4,0	Δ	0,88	14,0	2895	2,5	1LA3113-2AA20
9		380	4,0	Δ	0,82	8,8	1435	3,0	1LA3113-4AA40
10		660	5,5	Y	0,85	6,8	1450	2,8	LA 3130-4AA70
11		380	6,9	Δ	0,87	14,9	2930	3,0	1LA3131-2AA40
12		380	62	Δ	0,84	120	1485	2,4	1LA4280-B3-280S
13		660	75	Y	0,86	80	1480	2,4	1LA4280-B3-315S
14		380	26	Δ	0,86	51	2950	2,4	1LA4206-B3-200L
15		660	27,5	Y	0,83	32	1465	2,5	1LA4207-B3-200L
16		380	30	Δ	0,83	60	1470	2,5	1LA4207-B3-200L
17		380	30	Δ	0,87	58	2940	2,6	1LA4206-B3-200L
18		220	2,8	Δ	0,88	10	2890	2,5	1MA3113/2BB20
19		380	6,5	Y	0,91	14,9	2940	3,0	1MA3131/2AB20
20		380	37	Δ	0,89	70	2945	2,6	1LA4207-B3-200L
21		660	48	Y	0,85	53	1480	2,6	1LA4253-B3-250M
22		380	18	Δ	0,82	37	1465	2,6	1LA4186-B3-180L
23		220	0,55	Δ	0,81	2,5	2800	2,7	1LA3073-2AA20
24		380	132	Δ	0,87	245	1485	2,4	1LA4313-B3-315M
25		380	1,1	Y	0,85	1,47	2850	2,4	1LA3083-2AA70
26		380	7,2	Δ	0,81	15,4	1455	2,4	1LA3133-4AA40
27		380	15,2	Δ	0,9	28,5	2940	2,9	1LA3166-2AA40-Z
28		660	139	Y	0,85	150	1490	2,4	1LA4314-B3-315M
29		660	90	Y	0,86	97	1485	2,4	1LA4310-B3-315S
30		660	260	Y	0,89	270	1490	2,4	1LA4404-B3-400/1
31		380	132	Δ	0,92	235	1460	2,4	1RN2264-B3
32		380	160	Δ	0,87	300	970	2,4	1RN5355-B3
33		660	380	Y	0,88	400	1475	2,35	1RN5355-V10
34		660	400	Y	0,87	425	1475	2,35	1RN5403-B3
35		660	330	Y	0,85	360	981	2,4	1RN5405-B3
36		200	0,06	Y	0,48	0,7	5100	2,09	ДАТ42461

Окончание табл. 1

№	ФИО	U_1	$P_{\text{ном}}$	Гр. соедин.	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	$I_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	K_M	Обозначение (типоразмер)
37		200	0,09	Y	0,50	0,85	7000	2,28	ДАТ42561
38		220	0,18	Y	0,70	1,1	10880	3,02	ДАТ42672
39		200	0,37	Y	0,50	3,1	7400	2,0	ДАТ61560-1
40		220	0,75	Y	0,50	5,0	7400	3,51	ДАТ71570-1
41		380	160	Δ	0,92	278	2970	2,8	5AM315S2A3TB3
42		380	3,0	Y	0,7	3,75	700	2,4	B112M8
43		380	15,0	Y	0,76	17,3	724	2,2	B180M8
44		380	37	Y	0,78	41,5	735	2,0	B250S8
45		380	75	Y	0,83	79	738	2,5	B280M8
46		660	200	Y	0,81	125	592	2,4	BAO3-355L-10
47		660	200	Y	0,85	119	741	2,4	BAO3-355M-8
48		660	90	Y	0,83	54	738	2,2	BAO3-280M-8
49		10000	2650	Y	0,9	176	1492	2,2	AW710S2x4kV
50		10000	3400	Y	0,9	227	1487	2,2	AW800K2x4KV

Примечание. Двигатели вариантов 36-40 работают от сети частотой 400 Гц, остальные – 50 Гц.

В отчете должны быть представлены следующие разделы.

1. Расчет энергетических параметров номинального режима, критического скольжения и тока холостого хода.
2. Расчет механической характеристики.
3. Определение параметров упрощенной схемы замещения (Γ -образной).
4. (при необходимости углубленного исследования) Построение круговой диаграммы по значениям параметров упрощенной схемы замещения и намагничивающего тока.
5. Перечень графического материала:
 - механическая характеристика;
 - круговая диаграмма с обозначением на ней характерных точек, соответствующих значениям скольжения $s = 1$, $s = 0$ и $s = \pm \infty$.

IV. Методические указания к выполнению исследовательской работы

Раздел 1.

1.1. Рассчитать недостающие данные номинального режима: мощность, потребляемую из сети P_1 , КПД η , номинальный момент $M_{\text{ном}}$, номинальное скольжение из уравнений:

$$\eta = \frac{P_{\text{ном}}}{P_1};$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{m \cdot U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi};$$

$$M_{\text{ном}} [\text{Н} \cdot \text{м}] = 9555 \cdot \frac{P [\text{кВт}]}{n [\text{об/мин}]};$$

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_{\text{ном}}}{n_1}.$$

1.2. Рассчитать критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ по (5).

1.3. Выбрать относительное значение намагничивающего тока (тока холостого хода) $I_0/I_{\text{н}}$ в пределах $0,5 \div 0,25$. Меньшим значениям номинальной мощности и частоты вращения соответствуют большие значения относительного тока.

Раздел 2. Рассчитать по точкам механическую характеристику двигателя, подставляя в формулу Клосса (4) значения скольжения в диапазоне $0 \leq s \leq 1$. В области $0 < s < s_{\text{кр}}$ вычисления выполнять с меньшим шагом.

Раздел 3. Индуктивное и активное сопротивления короткого замыкания $X_{\text{к}}$ и $r'_{\text{кз}}$ схемы замещения определять по упрощенным зависимостям:

$$X_{\text{к}} = X_1 + X_2' \approx \frac{3 \cdot p \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega \cdot M_{\text{max}}};$$

$$r'_{\text{кз}} = r_1 + \frac{r_2'}{s} \approx \frac{r_2'}{s},$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$; $r_2' = s_{\text{кр}} \cdot X_{\text{к}}$.

Раздел 4. Построения начать исходя из намагничивающего тока, рассчитанного в разделе 1. Принять коэффициент мощности холостого хода $\cos \varphi_1 = 0,15$. Алгоритм построения содержится в [1-5].

После построений собственно диаграммы провести линию сопротивлений и отметить на ней характерные точки: $s = 1$ (короткое замыкание), $s = \pm \infty$, приняв $r_1 \approx 0,5 \cdot r_2'$, и теоретически показать положение точки идеального холостого хода на линии сопротивлений $s = 0$.

V. Примеры расчета

1. Асинхронный двигатель марки ДАТ 53671 имеет паспортные данные, приведенные в табл. 2.

Определяем недостающие данные номинального режима:

Напряжение сети (фазное) $U_{1\phi} = 127 \text{ В}$.

Потребляемая мощность $P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} = 479,3 \text{ Вт}$.

$$\text{КПД } \eta = \frac{P_{\text{ном}}}{P_1} = \frac{370}{479,3} = 0,772.$$

Таблица 2.
Паспортные данные двигателя марки ДАТ 53671

Параметр	Значение
Напряжение сети (линейное) U_1 , В	220
Частота сети f , Гц	400
Мощность (на валу) $P_{\text{ном}}$, Вт	370
Номинальный ток $I_{\text{ном}}$, А	1,70
Номинальный коэффициент мощности, $\cos\varphi_{\text{ном}}$	0,74
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, об/мин	11400
Кратность максимального момента K_M	2,72

$$\text{Номинальный момент } M_{\text{ном}} = 9555 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9555 \cdot \frac{0,370}{11400} = 0,31 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Частота вращения идеального холостого хода (частота вращения поля статора) $n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 400}{2} = 12000$ об/мин, где $p = 2$, определяется перебором, до получения ближайшего к номинальному значения.

$$\text{Номинальное скольжение } s_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_{\text{ном}}}{n_1} = \frac{12000 - 11400}{12000} = 0,05.$$

Определяем критическое скольжение из формулы Клосса, подставив в неё паспортное значение кратности максимального момента и номинальное скольжение $s_{\text{кр}} = 0,05 \cdot (2,72 + \sqrt{2,72^2 - 1}) = 0,262$.

Рассчитываем механическую характеристику в долях от номинального момента, подставляя значения скольжения в формулу Клосса в пределах $0 \leq s \leq 1$ и $M_{\text{мах}} = K_M \cdot M_{\text{ном}}$ (табл. 3, первая строка).

Таблица 3.
Механические характеристики серийных двигателей,
рассчитанные по формуле Клосса

s	1,0	$s_{\text{кр}2}=0,515$	$s_{\text{кр}1}=0,262$	$s_{\text{кр}3}=0,0791$	$s_{\text{ном}2}=0,075$	$s_{\text{ном}1}=0,05$	$s_{\text{ном}3}=0,01767$
$M/M_{\text{ном}1}$	1,335	2,20	2,72	2,62	1,437	1,0	0,207
$M/M_{\text{ном}2}$	2,86	3,51	2,84	1,052	1,0	0,674	0,136
$M/M_{\text{ном}3}$	0,37	0,705	1,30	2,35	2,35	2,12	1,0

2. Асинхронный двигатель марки ДАТ 71560-1 имеет паспортные данные, приведенные в табл. 4.

Таблица 4.
Паспортные данные двигателя марки ДАТ 71560-1

Параметр	Значение
Напряжение сети (линейное) U_1 , В	200
Частота сети f , Гц	400
Мощность (на валу) $P_{\text{ном}}$, Вт	750
Номинальный ток $I_{\text{ном}}$, А	5,3
Номинальный коэффициент мощности, $\cos\varphi_{\text{ном}}$	0,50
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, об/мин	7400
Кратность максимального момента K_M	3,51

Данные номинального режима:

Напряжение сети (фазное) $U_{1\phi} = 115,5$ В.

Потребляемая мощность $P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}} = 918$ Вт.

КПД $\eta = \frac{750}{918} = 0,815$.

Номинальный момент $M_{\text{ном}} = 9555 \cdot \frac{0,750}{7400} = 0,97$ Н·м.

Частота вращения идеального холостого 8000 об/мин при $p = 3$.

Номинальное скольжение $s_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_{\text{ном}}}{n_1} = \frac{8000 - 7400}{8000} = 0,075$.

Критическое скольжение $s_{\text{кр}} = 0,075 \cdot \left(3,51 + \sqrt{3,51^2 - 1}\right) = 0,515$.

Механическая характеристика $M/M_{\text{ном}2} = f(s)$ дана в строке 2 табл. 3.

3. Асинхронный двигатель марки 1RN5505 В3 (АЭС «Бушер», Иран, насос аварийного впрыска бора) имеет паспортные данные приведенные в табл. 5.

Таблица 5.
Паспортные данные двигателя марки 1RN5505 В3

Параметр	Значение
Напряжение сети (линейное) U_1 , В	10000
Частота сети f , Гц	50
Мощность (на валу) $P_{\text{ном}}$, кВт	570
Номинальный ток $I_{\text{ном}}$, А	38,5
Номинальный коэффициент мощности, $\cos\varphi_{\text{ном}}$	0,91
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, об/мин	2947
Кратность максимального момента K_M	2,35

Данные номинального режима:

Напряжение сети (фазное) $U_{1\phi} = 5773,5$ В.

Потребляемая мощность $P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}} = 606,8$ кВт.

$$\text{КПД } \eta = \frac{570}{606,8} = 0,939.$$

$$\text{Номинальный момент } M_{\text{ном}} = 9555 \cdot \frac{570}{2947} = 1848,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

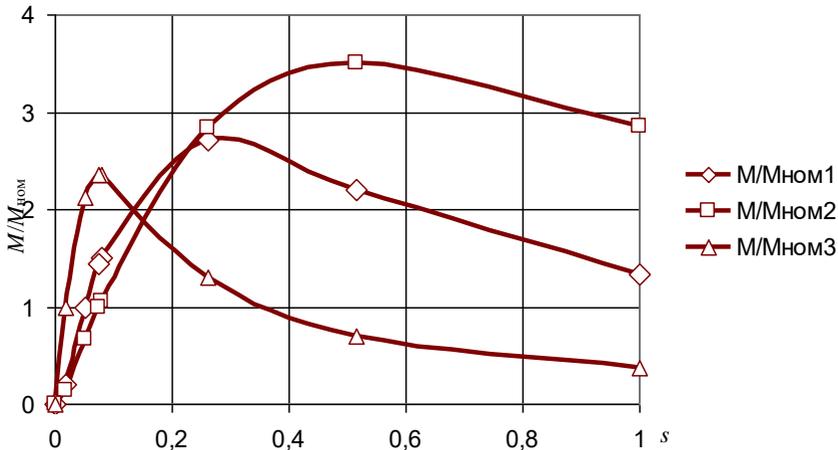
Частота вращения идеального холостого 3000 об/мин при $p = 1$.

$$\text{Номинальное скольжение } s_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_{\text{ном}}}{n_1} = \frac{3000 - 2947}{3000} = 0,0177.$$

Критическое скольжение:

$$s_{\text{кр}} = 0,0177 \cdot (2,35 + \sqrt{2,35^2 - 1}) = 0,0792.$$

Механическая характеристика $M/M_{\text{ном3}} = f(s)$ дана в третьей строке табл. 3.



VI. Выводы

Задача построения механических характеристик асинхронного двигателя по его паспортным данным представляет интерес в научно-прикладном плане при обосновании выбора серийного образца электродвигателя для конкретного механизма. Она также может быть включена в курс практических занятий по дисциплине «Электрические машины» в качестве дистанционно выполняемой расчетной лабораторной работы.

© Смирнов А.Ю., 2020

© Александрова Е.Н., 2020

© Усунц-Кригер Т.Н., 2020

Библиографический список

- [1] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. – 928 с.
- [2] Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2006. – 607 с.
- [3] Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцев, Ю.М. Ковалев и др. Асинхронные двигатели общего назначения / под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. М.: Энергия, 1980. – 488 с.
- [4] Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины Ч. 2. М.: Высшая школа, 1979. – 304 с.
- [5] Смирнов А.Ю. Электромеханика. Основы теории и вычислительный анализ электрических машин. Н. Новгород: НГТУ, 2014. – 290 с.

**A.Yu. Smirnov^{1,2,3}, E.N. Aleksandrova¹,
T.N. Usnunts-Kruger³**

**CONSTRUCTION OF MECHANICAL
CHARACTERISTICS OF INDUCTION MOTORS
ACCORDING TO PASSPORT DATA**

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

² Africantov Experimental Design Bureau for Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

³ National University of Science and Technology MISiS
(Moscow Institute of Steel and Alloys), Vyksunsky branch
Vyksa, Nizhegorodskaya oblast, Russia

Abstract. The definition procedure of mechanical characteristic in conformity of induction motor rated parameters and Kloss formula dummy research in justification of motor choice introduced. Procedure appropriated for by points torque-vs-displacement curve tracing in various drive integration and inside of «Electric machines» and «Electric drive» training courses with nominal parameters of serial motors as experimental results.

Keywords: electromagnetic torque, induction motor, kloss formula, maximal torque ratio, mechanical characteristic, slip.

References

- [1] A.V. Ivanov-Smolenskiy, *Elektricheskie mashiny [Electrical machines]*. Moscow: Energya, 1980 (in Russian).
- [2] I.P. Kopilov, *Elektricheskie mashiny [Electrical machines]*. Moscow: Energya, 1980 (in Russian).
- [3] E.P. Boyko, Yu.V. Gaintsev, Yu.M. Kovaluov et al. *Asinhronnye dvigateli obshchego naznacheniya [Asynchronous motors for common purposes]*, ed. V.M. Petrov and A.E. Cravchik. Moscow: Energya, 1980 (in Russian).
- [4] D.E. Bruskin, A.E. Zorohovitch and V.S. Hvostov, *Elektricheskie mashiny. Ch. 2 [Electrical machines. Part 2]*. Moscow: Vyshaya shkola, 1979 (in Russian).
- [5] A.Yu. Smirnov, *Elektromekhanika. Osnovy teorii i vychislitel'nyj analiz elektricheskikh mashin [Elektromechanics. Theory foundations and computational analysis of electric machines]*. Nizhny Novgorod: NNSTU, 2014 (in Russian).