

Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным

ГРИДИН В.М.

Предложены алгоритмы расчета характеристик асинхронных двигателей (АД) для различных значений напряжения питания, его частоты и момента нагрузки без применения итерационных процедур, с использованием только каталожных данных; отпадает необходимость экспериментального определения характеристик АД. В предлагаемых алгоритмах предусматривается определение параметров схем замещения АД и учитывается нелинейная зависимость тока холостого хода от напряжения питания и его частоты. Учет нелинейной зависимости заключается в расчете относительного значения магнитного потока в магнитопроводе статора и определении относительного значения тока холостого хода по относительной характеристике намагничивания. При этом наибольший эффект достигается при расчете характеристик АД небольшой мощности (примерно до 5 кВт) и особенно асинхронных микродвигателей, у которых относительный ток холостого хода имеет повышенные значения. Приведены примеры расчетов характеристик АД по каталожным данным.

К л ю ч е в ы е с л о в а: асинхронный двигатель, характеристики, алгоритмы расчета, магнитный поток, ток холостого хода, нелинейная зависимость

Автору публикуемой статьи не удалось найти в технической литературе работ, в которых предлагались бы алгоритмы расчёта характеристик асинхронных двигателей (АД) только по каталожным данным, что бывает необходимо при выборе и применении АД (см., например, [1–5]). Каталожные данные не используются, например, в выражении для электромагнитного момента. Выражение для механической характеристики допускает равенство момента нагрузки электромагнитному моменту. Не учитывается нелинейная зависимость тока холостого хода и намагничивающего тока от напряжения питания и его частоты. Согласно [4] «относительный ток холостого хода для двигателей мощностью от 1 до 100 кВт варьируется в пределах от 0,5 до 0,25; в микродвигателях – от 0,5 до 1,0», т.е. является значительным. Выражения, приведенные в известной литературе, используются при исследовании и проектировании АД, но не позволяют рассчитывать характеристики реальных, например серийных, АД.

В настоящей работе предлагаются алгоритмы расчета характеристик АД для различных значений напряжения питания, частоты его изменения и момента нагрузки без применения итерационных процедур, с использованием только каталожных данных. Такие расчеты заменяют определение характеристик АД экспериментальным путем.

В каталогах указаны номинальные значения напряжения питания (номинальное фазное напряжение обозначим U_H), частоты его изменения f_H , син-

хронной частоты вращения n_0 , т.е. числа оборотов в минуту вращающегося магнитного поля статора, и основных характеристик АД: мощности P_{2H} , скольжения s_H , коэффициента мощности $\cos\varphi_H$, КПД η_H , значения λ – отношения максимального вращающего момента на валу M_m к номинальному M_H .

Для расчета характеристик АД, кроме каталожных данных и значений фазного напряжения питания U , частоты его изменения f и момента нагрузки M , необходимо знать и использовать значения активных и индуктивных сопротивлений обмоток двигателя, номинальные значения тока холостого хода и намагничивающего тока, а также относительную характеристику (кривую) намагничивания магнитопровода статора.

Ниже приведены алгоритмы расчета характеристик АД по каталожным данным. Алгоритмы состоят из нескольких разделов. Курсивом показано происхождение отдельных выражений.

Расчет активных и индуктивных сопротивлений обмоток АД. Расчету указанных сопротивлений посвящена статья в [6]. Активные и индуктивные сопротивления обмоток АД, значения которых нужно рассчитывать, показаны на упрощенной Г-образной схеме замещения одной фазы АД (рис. 1). Согласно [4] «параметры асинхронных машин таковы, что переход от Т-образной схемы к упрощенной Г-образной не приводит к появлению заметных погрешностей».

На схеме рис. 1: r_1 , x_1 , Z_1 – активное, индуктивное и комплексное сопротивления обмотки стато-

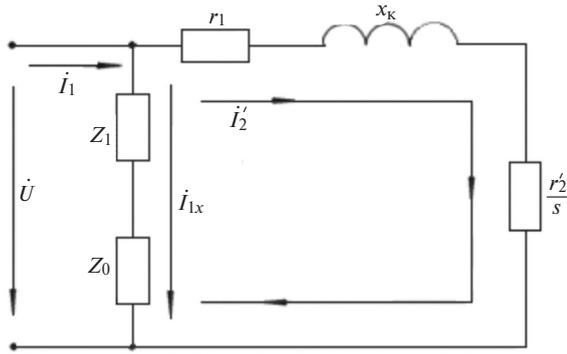


Рис. 1. Г-образная схема замещения одной фазы АД

ра; r'_2 и x'_2 – активное и индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенные к обмотке статора; $x_k = x_1 + x'_2$; Z_0 – комплексное сопротивление поперечной ветви для Т-образной схемы замещения АД; s – скольжение ротора; \dot{U} – фазное напряжение питания; \dot{I}_{1x} – ток холостого хода; \dot{I}'_2 – ток в обмотке ротора, приведенный к обмотке статора; \dot{I}_1 – потребляемый ток.

Индуктивные сопротивления обмоток пропорциональны частоте изменения напряжения питания f . Ток \dot{I}_{1x} зависит от напряжения питания U , частоты его изменения f и не зависит от момента нагрузки M . Скольжение s зависит от момента M . Ток \dot{I}'_2 пропорционален напряжению питания U , зависит от частоты его изменения f и от момента нагрузки M .

Согласно [6] предварительно рассчитываем значения промежуточных величин, как показано ниже:

$$a = \frac{r_1}{r'_2} = \frac{\alpha_0}{\xi} \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \frac{1 - s_H}{s_H} - 1,$$

где $\xi = M_{эмн} / M_H = 1,02 \div 1,08$; $M_{эмн}$ и M_H – номинальные электромагнитный и вращающий моменты. Значение коэффициента ξ тем меньше, чем больше мощность двигателя; $\alpha_0 = \frac{1}{1 + \beta_0}$; β_0 – коэффициент

загрузки АД, для которого значение КПД η максимально, обычно $\beta_0 = 0,7 \div 0,8$, например, при $\beta_0 = 0,8$ значение $\alpha_0 = 0,61$;

$$R_m = \frac{3U_H^2(1 - s_H)}{2P_{2H}(\lambda + \xi - 1)}; \quad G = \frac{1}{s_H^2} + \frac{2a}{s_H} + a^2;$$

$$b = \frac{\lambda + \xi - 1}{\xi}.$$

Искомые сопротивления обмоток АД:

$$r'_2 = \frac{R_m}{G} \left[\frac{b}{s_H} + a + \sqrt{\left(\frac{b}{s_H} + a \right)^2 - G} \right]; \quad r_1 = ar'_2;$$

$$x_k = \sqrt{R_m^2 - 2R_m r'_1}.$$

Сопротивления Z_0 и $Z_1 + Z_0 = (1,02 \div 1,06)Z_0$ можно определить после расчета номинальных значений тока холостого хода АД I_{1x} и разности фаз φ_x между этим током и напряжением питания [6], но в расчетах характеристик АД эти сопротивления не участвуют.

Расчет номинальных значений тока холостого хода и намагничивающего тока. Номинальные значения указанных токов рассчитываем для номинальных значений фазного напряжения питания U_H , частоты его изменения f_H и холостого хода двигателя в следующей последовательности.

Потребляемые мощность и фазный ток:

$$P_{1H} = P_{2H} / \eta_H; \quad I_{1H} = P_{1H} / (3U_H \cos \varphi_H).$$

Ток в обмотке ротора, приведенный к обмотке статора,

$$\dot{I}'_{2H} = \frac{U_H}{\sqrt{(r_1 + r'_2 / s_H)^2 + x_k^2}}.$$

Угол между векторами тока \dot{I}'_{1H} и напряжения U_H

$$\varphi_H = \arccos(\cos \varphi_H).$$

Угол между векторами тока \dot{I}'_{2H} и напряжения U_H

$$\varphi_{2H} = \arctg\left(\frac{x_k}{r_1 + r'_2 / s_H}\right).$$

Ток холостого хода

$$I_{1x} = I_{x0} = \sqrt{I_{1H}^2 + I_{2H}'^2 - 2I_{1H}I_{2H}' \cos(\varphi_H - \varphi_{2H})};$$

$$\cos \varphi_x = \cos \varphi_{x0} = (I_{1H} \cos \varphi_H - I_{2H}' \cos \varphi_{2H}) / I_{x0};$$

$$\varphi_x = \varphi_{x0} = \arccos(\cos \varphi_{x0}).$$

Здесь $\varphi_x = \varphi_{x0}$ – угол между векторами напряжения U и током $I_{1x} = I_{x0}$. Обозначения I_{x0} , φ_{x0} и $\cos \varphi_{x0}$ относятся только к случаю $U = U_H$ и $f = f_H$, а обозначения I_{1x} , φ_x и $\cos \varphi_x$ применяются для всех случаев.

Намагничивающий ток – реактивная составляющая тока холостого хода. Его номинальное значение рассчитаем, если задано $U \neq U_H$ или ($\omega \neq \omega_H$), по приближенной формуле:

$$I_{мн} = I_{1x} \sin \varphi_x = I_{x0} \sin \varphi_{x0}.$$

Формулы для тока $I_{1x} = I_{x0}$ и $\cos \varphi_x = \cos \varphi_{x0}$ получены при рассмотрении векторной диаграммы АД на рис. 2 применительно к номинальному режиму работы АД.

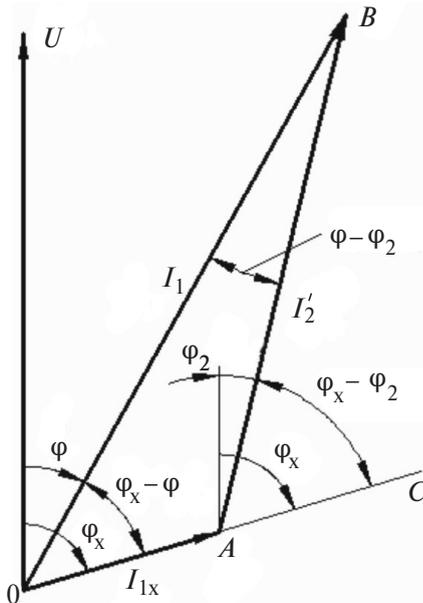


Рис. 2. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Расчет характеристик АД для заданных значений момента нагрузки, фазного напряжения питания U и номинального значения частоты его изменения f_H .

Значения характеристик АД рассчитываем в следующей последовательности:

$$\Omega_0 = n_0 / 9,55; \quad n_H = n_0 (1 - s_H); \quad M_H = 9,55 P_{2H} / n_H; \\ M_0 = M_{эм} - M_H = (\xi - 1) M_H,$$

где n_0 и Ω_0 – заданные синхронная частота вращения и соответствующая угловая частота; n_H и M_H – номинальные значения частоты вращения вала двигателя и момента. Момент M_0 пропорционален мощности механических потерь. Его значение для n считаем равным значению для n_H , так как значения n и n_H отличаются незначительно.

Вспомогательная величина – условное сопротивление, учитывающее исходные значения напряжения U и момента M :

$$R_s = \frac{3U^2}{2(M + M_0)\Omega_0} - r_1.$$

Скольжение ротора

$$s = \frac{r_2'}{R_s + \sqrt{R_s^2 - (r_1^2 + x_k^2)}}.$$

Выражения для R_s и s получены из известной формулы для электромагнитного момента:

$$M_{эм} = \frac{3U^2 r_2' / s}{\Omega_0 [(r_1 + r_2' / s)^2 + x_k^2]} = M + M_0;$$

$$I_2' = \frac{U}{\sqrt{(r_1 + r_2' / s)^2 + x_k^2}}; \quad \varphi_2 = \arctg \left(\frac{x_k}{r_1 + r_2' / s} \right).$$

Если задано $U = U_H$, то $I_{1x} = I_{x0}$, $\varphi_x = \varphi_{x0}$, $\cos \varphi_x = \cos \varphi_{x0}$; далее рассчитываем ток I_1 и $\cos \varphi$ по формулам:

$$I_1 = \sqrt{I_{x0}^2 + I_2'^2 + 2I_{x0}I_2' \cos(\varphi_{x0} - \varphi_2)};$$

$$\cos \varphi = (I_{x0} \cos \varphi_{x0} + I_2' \cos \varphi_2) / I_1.$$

Если задано $U \neq U_H$, то далее предварительно определяем относительное значение магнитного потока Φ , т.е. отношение магнитного потока в статоре к номинальному потоку; зная Φ , находим относительный намагничивающий ток i , т.е. отношение намагничивающего тока I_M к номинальному намагничивающему току I_{MH} :

$$\Phi = U / U_H,$$

так как магнитный поток пропорционален напряжению питания U и обратно пропорционален частоте f ; здесь $f = f_H$.

Для определения относительного значения тока i используем относительную характеристику намагничивания магнитопровода статора $\Phi(i)$. В литературе, например в [5], такая характеристика приведена в графическом виде. Она или другая подобная характеристика должна быть аппроксимирована с помощью программы MATLAB или MATHCAD полиномом k -й степени по $(k+1)$ точкам на отрезке характеристики $\Phi(i)$, в средней части которого находится середина колена характеристики. Согласно [2] номинальному режиму работы двигателя должна соответствовать точка с координатами $i=1$ и $\Phi=1$, находящаяся несколько выше середины колена характеристики намагничивания.

Относительный ток i определяем с помощью одной из указанных программ как корень уравнения $\Phi(i) = \Phi_p$, где Φ_p – рассчитанное значение относительного магнитного потока Φ . Значение корня должно находиться в интервале $i=0,4 \div 2,5$.

В частности, при $k+1=3$ характеристика $\Phi(i)$ согласно [7] выглядит как

$$\Phi = -\alpha i^2 + \beta i + \gamma.$$

В [7] для характеристики $\Phi(i)$, приведенной в [5], получены следующие значения: $\alpha=0,229$, $\beta=0,988$, $\gamma=0,242$. Из выражения для $\Phi(i)$ следует формула для относительного значения намагничивающего тока

$$i = [\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha(\Phi - \gamma)}] / 2\alpha,$$

которую используем для определения значения i при аппроксимации характеристики намагничивания по трем точкам.

Намагничивающий ток

$$I_M = I_{1X} \sin \varphi_X = i I_{X0} \sin \varphi_{X0} = i I_{MH}.$$

Приближенно считаем, что $\sin \varphi_X = \sin \varphi_{X0}$, а следовательно, $\varphi_X = \varphi_{X0}$, $I_{1X} = i I_{X0}$ по следующей причине. Угол φ_X обычно не меньше 75° , при $\varphi_X = 75 \div 85^\circ$ значение $\sin \varphi_X = 0,966 \div 0,996$, т.е. изменяется незначительно, поэтому, полагая $\varphi_X = \varphi_{X0}$, сначала рассчитываем ток I_{1X} по формуле

$$I_{1X} = i I_{X0},$$

а затем — ток I_1 и $\cos \varphi$ по формулам:

$$I_1 = \sqrt{I_{1X}^2 + I_2'^2 + 2 I_{1X} I_2' \cos(\varphi_{X0} - \varphi_2)};$$

$$\cos \varphi = (I_{1X} \cos \varphi_{X0} + I_2' \cos \varphi_2) / I_1.$$

Формулы для I_1 и $\cos \varphi$ получены из рассмотрения векторной диаграммы на рис. 2 применительно к ненормальному режиму работы АД (см. выше).

Остальные характеристики АД рассчитываем по известным формулам:

$$n = n_0(1 - s); \quad P_2 = Mn / 9,55; \quad P_1 = 2UI_1 \cos \varphi; \\ \eta = P_2 / P_1.$$

Особенности расчета характеристик АД для ненормального значения частоты изменения напряжения питания f . Для случая $f \neq f_H$ применяем отношение частот $c = f / f_H$, а в обозначениях характеристик, выраженных с использованием этого отношения, используем дополнительный индекс c :

$$n_{0c} = n_0 c; \quad \Omega_{0c} = \Omega_0 c; \quad x_{kc} = x_k c; \quad M_{0c} = M_0 c^v.$$

Значение показателя степени $v = 1,5 \div 2,5$ зависит от типа и смазки подшипников, рода вентиляции [2]. Его можно определить по результатам испытаний серийного АД.

Относительное значение магнитного потока рассчитываем по формуле

$$\Phi = U / (U_H)_c,$$

так как магнитный поток пропорционален напряжению питания U и обратно пропорционален частоте f . Поскольку $\Phi = \Phi(i)$, то относительное значение намагничивающего тока i и ток холостого хода также зависят от U и f .

Значения сопротивления R_s , скольжения s , тока I_2' , угла φ_2 , частоты вращения n рассчитываем по уточненным формулам, в которых используются угловая скорость Ω_{0c} вместо Ω_0 , момент M_{0c} вместо M_0 , индуктивное сопротивление x_{kc} вместо x_k , частота вращения n_{0c} вместо n_0 . Относительное значение i и значения абсолютных токов намагничивания I_{MH} , I_M , тока I_{1X} , угла φ_X , тока I_1 , $\cos \varphi$, полезной P_2 и потребляемой мощности, КПД

η нужно рассчитывать по вышеуказанным формулам.

Примеры расчетов характеристик АД по каталожным данным. *Пример 1.* Двигатель имеет следующие номинальные характеристики: $U_H = 380$ В (фазное напряжение); $P_{2H} = 15000$ Вт; $n_0 = 1500$ об/мин; $s_H = 0,016$; $\cos \varphi_H = 0,89$; $\eta_H = 0,89$, $\lambda = 2,0$, указанные в [6]; нагружен номинальным моментом $M = M_H$ и питается пониженным напряжением $U = 0,8U_H = 304$ В.

Рассчитаем значения активных и индуктивных сопротивлений обмоток АД. Примем $\xi = 1,05$, $\beta_0 = 0,8$. Получим следующие значения промежуточных величин и сопротивлений обмоток [6]:

$$a = 3,573; \quad b = 1,986; \quad R_m = 7,055 \text{ Ом}; \quad G = 4365;$$

$$r_2' = 0,383 \text{ Ом}; \quad r_1 = 1,368 \text{ Ом}; \quad x_k = 5,52 \text{ Ом}.$$

Рассчитаем значения номинальных характеристик АД и промежуточных величин:

$$I_{1H} = 16,61 \text{ А}; \quad I_{X0} = 4,472 \text{ А} = 0,269 I_{1H}; \quad \varphi_{X0} = 84^\circ 10'; \\ \Omega_0 = 157 \text{ 1/с}; \quad n_H = 1476 \text{ об/мин}; \quad M_H = 97,05 \text{ Н·м}; \\ M_0 = 4,853 \text{ Н·м}; \quad R_s = 7,297 \text{ Ом}; \quad s = 0,0323; \quad \Phi = 0,8; \\ i = 0,65; \quad I_{1X} = 2,910 \text{ А}.$$

Наконец, рассчитаем значения искомым характеристик АД:

$$I_1 = 22,76 \text{ А}; \quad \cos \varphi = 0,874, \quad n = 1451 = 0,983 \times 1476 \text{ об/мин}; \\ P_1 = 18142 \text{ Вт}, \quad P_2 = 14746 = 0,983 \times 15000 \text{ Вт}; \\ \eta = 0,813 = 0,913 \times 0,89.$$

Пример 2. Тот же АД нагружен номинальным моментом $M = M_H$ и питается повышенным напряжением $U = 1,1U_H = 418$ В. Ниже приведены результаты расчета характеристик АД, отличающиеся от полученных в *примере 1*: $R_s = 15,02$ Ом; $s = 0,0132$; $\Phi = 1,1$; $i = 1,27$; $I_{1X} = 5,680$ А; $I_1 = 16,06 = 0,967 \times 16,61$ А; $\cos \varphi = 0,865$; $n = 1480 = 1,003 \times 1476$ об/мин; $P_1 = 17420$ Вт; $P_2 = 15043$ Вт = $1,003 \times 15000$ Вт; $\eta = 0,864 = 0,971 \times 0,89$.

Дополнительно были рассчитаны характеристики АД, указанного в [6] и *примерах 1 и 2*, но без учета зависимости тока холостого хода от напряжения питания, т.е. считали $I_{1X} = I_{X0} = 4,472$ А; $\varphi_X = \varphi_{X0} = 84^\circ 10'$. Получены следующие результаты, отличающиеся от результатов предыдущих расчетов характеристик АД.

$$\text{Для примера 1: } I_1 = 23,69 \approx 1,04 \times 22,76 \text{ А}; \quad \cos \varphi = 0,841 \approx 0,96 \times 0,874; \\ P_1 = 18298 \approx 1,01 \times 18142 \text{ Вт}; \\ \eta = 0,807 \approx 0,99 \times 0,813.$$

$$\text{Для примера 2: } I_1 = 15,37 \approx 0,96 \times 16,06 \text{ А}; \\ \cos \varphi = 0,898 \approx 1,04 \times 0,865; \quad P_1 = 17250 \approx 0,99 \times 17420 \text{ Вт}; \\ \eta = 0,872 \approx 1,01 \times 0,864.$$

Различие соответствующих характеристик АД мощностью 15 кВт составляет от 1 до 4%. Небольшое различие объясняется небольшим значением (0,269) относительного тока холостого хода (I_{X0}/I_{1H}). Согласно [4] этот ток тем больше, чем меньше мощность АД, при мощности 1 кВт он мо-

жет быть равным 0,5, а у асинхронных микродвигателей – еще больше. Соответственно, чем меньше мощность АД, тем больше различие характеристик АД при учете и неучете нелинейной зависимости тока холостого хода от напряжения питания и частоты его изменения, т.е. тем больше эффект (польза) от учета указанной зависимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вешневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977, 432 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для вузов. Л.: Энергия, 1974, 840 с.
3. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, Логос, 2000, 607 с.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1980, 928 с.
5. Сборник задач по электротехнике и основам электроники/Под ред. В.Г. Герасимова. М.: Высшая школа, 1984, 253 с.

6. Гридин В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным. – Электричество, 2012, № 5, с. 40–44.

7. Гридин В.М. Расчет характеристик двигателей постоянного тока со смешанным возбуждением по каталожным данным. – Электричество, 2018, № 3, с. 38–43.

[26.03.2018]

Автор благодарит рецензента канд. техн. наук Ю.А. Мошинского за профессиональную оценку рукописи, полезные замечания, учет которых, по мнению автора, значительно улучшил содержание статьи.

А в т о р: Гридин Владимир Михайлович окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1963 г. Кандидатскую диссертацию «Исследование и расчет трехфазных бесконтактных двигателей постоянного тока с однополупериодной коммутацией» защитил в 1979 г. Доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Elektrichestvo, 2018, No. 9, pp. 44–48

DOI:10.24160/0013-5380-2018-9-44-48

Calculating the Characteristics of Induction Motors from the Catalogue Data

GRIDIN Vladimir M. (Moscow State Technical University named N.E. Bauman, Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The article suggests algorithms for calculating the characteristics of induction motors (IMs) for different values of power supply voltage and frequency, and load torque without the need to apply iteration procedures. The proposed algorithms use only catalogue data, and there is no need to experimentally determine the IM characteristics. The proposed algorithms determine the parameters of IM equivalent circuits and take into account the nonlinear dependence of no-load current on power supply voltage and frequency. The above-mentioned nonlinear dependence is taken into account by calculating the relative magnetic flux in the stator core and determining the relative no-load current from the relative magnetization characteristic. In so doing, the best results are obtained in calculating the characteristics of moderate capacity IMs (approximately up to 5 kW) and especially in calculating the characteristics of induction micromotors having an increased relative no-load current. Example calculations of IM characteristics from catalogue data are given.

Key words: induction motor, characteristics, calculation algorithms, magnetic flux, no-load current, nonlinear dependence

REFERENCES

1. Veshnevskiy S.N. *Kharakteristiki dvigateley v elektroprivode* (Characteristics of motors in the electric drive). Moscow, Energiya, 1977, 432 p.
2. Vol'dek A.I. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Leningrad, Energiya, 1974, 840 p.
3. Kopylov I.P. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Vysshaya shkola, Logos, 2000, 607 p.
4. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow, Energiya, 1980, 928 p.

5. *Sbornik zadach po elektrotehnike i osnovam elektroniki/ Pod red. V.G. Gerasimova* (Collection of problems in electrical engineering and the basis of electronics/Edit. by V.G. Gerasimov). Moscow, Vysshaya shkola, 1984, 253 p.

6. Gridin V.M. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 5, pp. 40–44.

7. Gridin V.M. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 3, pp. 38–43.

[26.03.2018]