

8 ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

158. Вначале выполним расчёт пусковых характеристик с учётом эффекта вытеснения тока, но без учета влияния насыщения от полей рассеяния.

Расчёт проведём для ряда скольжений, который будет начинаться со значения чуть ниже критического и заканчиваться $s = 1$. Значение критического скольжения также необходимо включить в расчётный ряд (стр. 62).

Далее произведем подробный расчёт для значения скольжения $s = 1,0$.

159. Расчётная высота стержня в пазу ротора по (8.2), т.к. паз закрытый:

$$h_{c2} = h_{n2} - (h_{w2} + h'_{w2}) = 37.1 - (0.7 + 1) = 36.1 \text{ мм.}$$

160. Так называемая “приведённая высота” стержня ротора (стр. 57-58 – обмотка ротора литая с алюминиевыми стержнями, расчётная температура $t_{\text{расч}} = 115^\circ\text{C}$):

$$\zeta = 63.61 \cdot h_{c2} \cdot \sqrt{s} = 63.61 \cdot 0.0361 \cdot \sqrt{1} = 2.296$$

161. По рис. П.22 и П.23 соответственно находим значения величин φ и φ' :

$$\varphi = f(\zeta) = 1.172;$$

$$\varphi' = f(\zeta) = 0.66.$$

162. Глубина проникновения тока:

$$h_p = \frac{h_{c2}}{1 + \varphi} = \frac{36.1}{1 + 1.172} = 16.62 \text{ мм}$$

163. Проверяем условие (стр. 58):

$$\frac{b_1}{2} < h_p < h_1 + \frac{b_1}{2}$$

$$\frac{10.2}{2} < 16.62 < 29.8 + \frac{10.2}{2}$$

$$5.1 < 16.62 < 34.9$$

					КР.1-43.01.03.22с.15 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата				
Разраб.		Кощенко			Пусковые характеристики АД			
Пров.		Козлов						
Н. контр.								
Утв.								
					ГГТУ, гр. 3Э-22с			

Условие выполняется, поэтому площадь сечения верхней части стержня ротора q_p , по которому распространяется ток при пуске, определится по формуле (8.6):

$$q_p = \frac{\pi \cdot b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_p}{2} \cdot \left(h_p - \frac{b_p}{2} \right) = \frac{\pi \cdot 10.2^2}{8} + \frac{10.2 + 7.185}{2} \cdot \left(16.62 - \frac{10.2}{2} \right) = 140.996 \text{ мм}^2,$$

где по (8.7)

$$b_p = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left(h_p - \frac{b_1}{2} \right) = 10.2 - \frac{10.2 - 2.4}{30.5} \cdot \left(16.62 - \frac{10.2}{2} \right) = 7.185 \text{ мм}.$$

164. Коэффициент k_p по (8.8), т.к. выполняется условие на стр. 58:

$$k_p = \frac{q_c}{q_p} = \frac{230.9}{140.996} = 1.638.$$

165. Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = \frac{r_2 + r'_c \cdot (k_p - 1)}{r_2} = \frac{35.89 \cdot 10^{-6} + 39.51 \cdot 10^{-6} \cdot (1.638 - 1)}{35.89 \cdot 10^{-6}} = 1.702$$

где $r'_c = r_c = 39.51 \cdot 10^{-6}$ Ом (по (8.11)).

166. Приведенное активное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$r'_{2\zeta} = K_R \cdot r_2 = 1.702 \cdot 0.155 = 0.263 \text{ Ом}.$$

167. Коэффициент магнитной проводимости участка паза ротора, занятого проводником с обмоткой:

$$\lambda'_{n2} = \left[\frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right) + 0,66 - \frac{b_{m2}}{2 \cdot b_1} \right] = \left[\frac{30.76}{3 \cdot 10.2} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 10.2^2}{2 \cdot 230.9} \right) + 0,66 - \frac{1.5}{2 \cdot 10.2} \right] = 1.414.$$

168. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока:

$$\lambda_{n2\zeta} = \lambda_{n2} - \lambda'_{n2\zeta} = 2.27 - 0.48 = 1.789,$$

где

$$\lambda'_{n2\zeta} = \lambda'_{n2} \cdot (1 - k_D) = 1.414 \cdot (1 - 0.66) = 0.48;$$

$$k_D = \varphi' = f(\zeta) = 0.66.$$

169. Коэффициент, показывающий изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока:

$$K_X = \frac{\lambda_{n2\zeta} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = \frac{1.789 + 1.263 + 2.342}{2.27 + 1.263 + 2.342} = 0.918.$$

170. Приведенное индуктивное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$x'_{2\zeta} = K_X \cdot x'_2 = 0.918 \cdot 0.961 = 0.883 \text{ Ом}.$$

171. В пусковом режиме активным сопротивлением r'_{12} схемы замещения АД на рис. П.20, б пренебрегают, то есть $r_{12n} = 0 \text{ Ом}$ (стр. 60).

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции в схеме замещения АД (рис. П.20, б) в пусковом режиме:

$$x_{12n} = k_\mu \cdot x_{12} = 1.756 \cdot 36.478 = 64.073 \text{ Ом}.$$

172. Коэффициент c_1 в пусковом режиме АД :

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}} = 1 + \frac{0.677}{64.0731} = 1.011$$

173. Активное R_Π и реактивное X_Π сопротивления правой ветви Г-образной схемы замещения АД (рис. 7.1) в пусковом режиме с учётом вытеснения тока:

$$R_\Pi = r_1 + \frac{c_{1п} \cdot r'_{2\zeta}}{s} = 0.28 + \frac{1.011 \cdot 0.263}{1} = 0.546 \text{ Ом},$$

$$X_\Pi = x_1 + c_{1п} \cdot x'_{2\zeta} = 0.677 + 1.011 \cdot 0.883 = 1.569 \text{ Ом}.$$

174. Ток в обмотке ротора с учётом вытеснения тока в пусковом режиме при $s = 1,0$:

$$I'_{2п} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_\Pi^2 + X_\Pi^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.546^2 + 1.569^2}} = 132.411 \text{ А}.$$

175. Пусковой ток статора с учётом вытеснения тока:

$$I_{1п} = I_{2п} \cdot \frac{\sqrt{R_{п}^2 + (X_{п} + x_{12п})^2}}{c_{1п} \cdot x_{12п}} = 132.411 \cdot \frac{\sqrt{0.546^2 + (1.569 + 64.073)^2}}{1.011 \cdot 64.073} = 134.239 \text{ А.}$$

176. Кратность пускового тока АД с учётом вытеснения тока при скольжении $s = 1$:

$$I_{1п}^* = \frac{I_{1п}}{I_{1ном}} = \frac{134.239}{36.486} = 3.679.$$

177. Кратность пускового момента АД с учётом вытеснения тока при скольжении $s = 1$:

$$M^* = \left(\frac{I_{2п}}{I_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{ном}}{s} = \left(\frac{132.411}{34.72} \right)^2 \cdot 1.702 \cdot \frac{0.027}{1} = 0.668.$$

где $I_{2ном} = 29.487 \text{ А}$ – значение приведённого тока ротора при номинальном скольжении $s_{ном} = 0.036$ (определено по расчетам п.7).

178. Предварительно значение критического скольжения можно оценить по формуле:

$$s_{кр} = \frac{r_2}{\frac{x_1}{c_{1п}} + x_2} = \frac{0.155}{\frac{0.677}{1.011} + 0.961} = 0.095.$$

По аналогии с рабочими характеристиками расчет пусковых характеристик также произведем на ПЭВМ в пакете MathCAD. Пример расчета показан выше для точки $s=1$.

Диапазон s для расчета примем $s=0.04 \dots 1.0$.

Построенные пусковые характеристики (то есть графики зависимостей $M^* = f(s)$ и $I_{1п}^* = f(s)$) показаны на рис. 6-7.

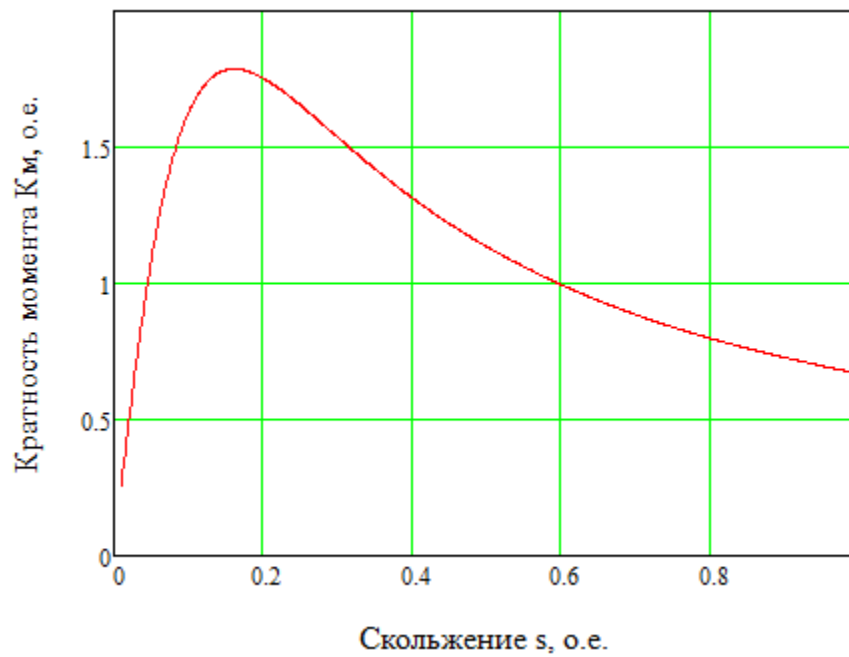


Рисунок 6 – Зависимость $M^* = f(s)$

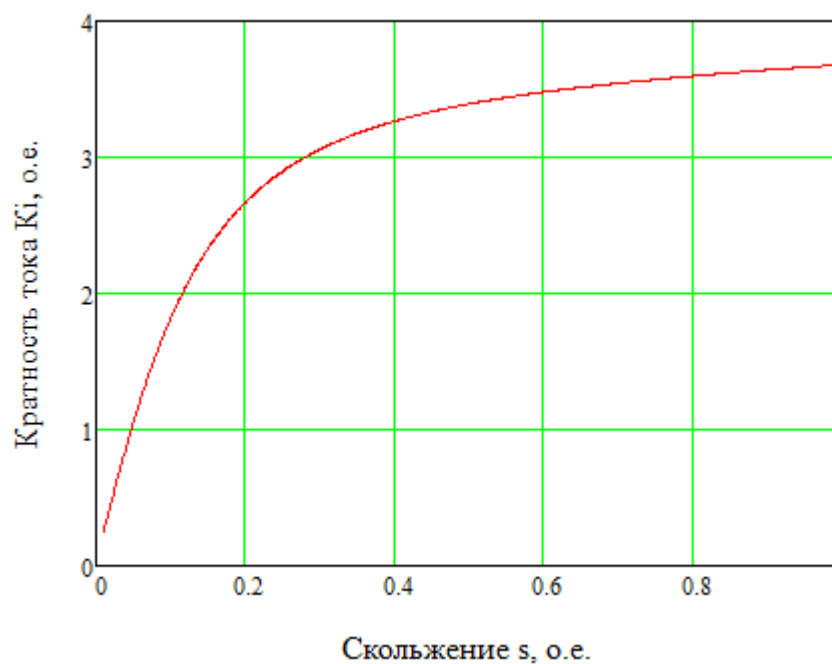


Рисунок 7 – Зависимость $I^* = f(s)$

По построенным пусковым характеристикам (рис. 12.2) уточняем, что $s_{кр} = 0.161$.

Найдём максимальный момент АД, соответствующий критическому скольжению, с учётом вытеснения тока:

$$M_{\max}^* = \left(\frac{I_{2п}}{I_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{кр}}{s} = \left(\frac{132.411}{34.72} \right)^2 \cdot 1.702 \cdot \frac{0.161}{1} = 1.787.$$

179. Определим необходимость учёта влияния насыщения от полей рассеяния при расчёте пусковых характеристик АД. Для этого найдём значение полного тока паза статора в начальный момент времени пуска двигателя, то есть при $s = 1,0$:

$$I_{1паза} = \frac{I_{1п} \cdot u_n}{a} = \frac{134.064 \cdot 20}{1} = 2681 \text{ A}.$$

Полученное значение $I_{1паза} > 400 \text{ A}$, поэтому учёт влияния насыщения от полей рассеяния при расчёте пусковых характеристик АД необходим (стр. 64).

180. Выполним расчёт пусковых характеристик с учётом эффекта вытеснения тока и влияния насыщения от полей рассеяния.

Расчётный ряд скольжений s примем таким же, что и при расчёте с учётом только вытеснения тока: $0,04 \dots 1,0$.

Ниже для примера произведем подробный расчёт для значения скольжения $s = 1,0$.

181. Первоначально зададимся значением коэффициента увеличения тока от насыщения зубцовой зоны полями рассеяния (рекомендации на стр. 65):

$$k_{нас} = 1.33.$$

182. Средняя МДС обмотки, отнесенная к одному пазу обмотки статора:

$$\begin{aligned} F_{н.ср} &= 0.7 \cdot \frac{k_{нас} \cdot I_{1п} \cdot u_n}{a} \cdot \left(k_{\beta} + k_y \cdot k_{обм1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) \\ &= 0.7 \cdot \frac{1.33 \cdot 1334.1 \cdot 20}{1} \cdot \left(0.85 + 0.97 \cdot 0.928 \cdot \frac{30}{24} \right) = 4932 \text{ A}. \end{aligned}$$

183. Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре:

$$B_{\phi.\delta} = \frac{F_{н.ср}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-3} = \frac{4932}{1.6 \cdot 0.6 \cdot 0.963} \cdot 10^{-3} = 5.336 \text{ Тл},$$

где коэффициент

$$C_N = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{0.6}{16 + 20.0}} = 0.963.$$

184. Коэффициент K_δ , характеризующий отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины (рис. П.26):

$$K_\delta = f(B_{\phi.\delta}) = f(5.336) = 0.47.$$

185. Дополнительное эквивалентное раскрытие пазов статора:

$$c_{\varepsilon 1} = (t_{z1} - b_{ш1}) \cdot (1 - K_\delta) = (16 - 4) \cdot (1 - 0.47) = 6.36 \text{ мм.}$$

186. Паз статора полузакрытый, поэтому вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния паза статора (стр. 66, формула (8.34)):

$$\Delta\lambda_{n1.\text{нас}} = \frac{h_{ш1} + 0.58 \cdot h_k}{b_{ш1}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 1}}{c_{\varepsilon 1} + 1.5 \cdot b_{ш1}} = \frac{1 + 0.58 \cdot 3.4}{4} \cdot \frac{6.36}{6.36 + 1.5 \cdot 4} = 0.382.$$

187. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора при насыщении:

$$\lambda_{n1.\text{нас}} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1.\text{нас}} = 1.219 - 0.382 = 0.836.$$

188. Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов статора:

$$\lambda_{\partial 1.\text{нас}} = \lambda_{\partial 1} \cdot K_\delta = 1.251 \cdot 0.47 = 0.588.$$

189. Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом насыщения от полей рассеяния:

$$x_{1.\text{нас}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{n1.\text{нас}} + \lambda_{\partial 1.\text{нас}} + \lambda_{л2}}{\lambda_{n1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}} = 0.677 \cdot \frac{0.836 + 0.588 + 2.293}{1.219 + 1.251 + 2.293} = 0.529 \text{ Ом.}$$

190. Дополнительное эквивалентное раскрытие пазов ротора:

$$c_{\varepsilon 2} = (t_{z2} - b_{ш2}) \cdot (1 - K_\delta) = (20.0 - 1.5) \cdot (1 - 0.47) = 9.806 \text{ мм.}$$

191. Паз ротора закрытый, поэтому вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния паза ротора (стр. 66, формула (8.36)):

$$\lambda_{n2.\text{нас}} = \frac{h_{ш2} + h'_{ш2}}{b_{ш2}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 2}}{b_{ш2} + c_{\varepsilon 2}} = \frac{0.7 + 0.3}{1.5} \cdot \frac{9.806}{9.806 + 1.5} = 0.578.$$

					КР.1-43.01.03.22с.15 ПЗ		Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата			

192. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора при насыщении:

$$\lambda_{n2\zeta, \text{нас}} = \lambda_{n2\zeta} - \Delta\lambda_{n2, \text{нас}} = 1.789 - 0.578 = 1.211.$$

193. Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов ротора:

$$\lambda_{\partial 2, \text{нас}} = \lambda_{\partial 2} \cdot K_{\delta} = 2.342 \cdot 0.47 = 1.101.$$

194. Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом насыщения от полей рассеяния:

$$x'_{2, \text{нас}} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{n2\zeta, \text{нас}} + \lambda_{\partial 2, \text{нас}} + \lambda_{л2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0.961 \cdot \frac{1.211 + 1.101 + 1.263}{2.27 + 2.342 + 1.263} = 0.585 \text{ Ом.}$$

195. Коэффициент c_1 в пусковом режиме АД с учётом насыщения:

$$c_{1\text{п.нас}} = 1 + \frac{x_{1, \text{нас}}}{x_{12n}} = 1 + \frac{0.529}{64.073} = 1.008$$

196. Активное $R_{\text{п.нас}}$ и реактивное $X_{\text{п.нас}}$ сопротивления правой ветви Г-образной схемы замещения АД (рис. 7.1) в пусковом режиме с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$R_{\text{п.нас}} = r_1 + \frac{c_{1\text{п.нас}} \cdot r'_{2\zeta}}{s} = 0.28 + \frac{1.008 \cdot 0.263}{1} = 0.545 \text{ Ом,}$$

$$X_{\text{п.нас}} = x_{1, \text{нас}} + c_{1\text{п.нас}} \cdot x'_{2\zeta, \text{нас}} = 0.529 + 1.008 \cdot 0.585 = 1.118 \text{ Ом.}$$

197. Ток в обмотке ротора в пусковом режиме с учётом вытеснения тока и насыщения при $s=1.0$:

$$I'_{2\text{п.нас}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + X_{\text{п.нас}}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.545^2 + 1.118^2}} = 176.812 \text{ А.}$$

198. Пусковой ток статора с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$I_{1\text{п.нас}} = I'_{2\text{п.нас}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + (X_{\text{п.нас}} + x_{12n})^2}}{c_{1\text{п.нас}} \cdot x_{12n}} = 176.812 \cdot \frac{\sqrt{0.545^2 + (1.118 + 64.073)^2}}{1.008 \cdot 64.073} = 178.432 \text{ А.}$$

199. Кратность пускового тока АД с учётом вытеснения тока и насыщения при скольжении $s = 1,0$:

$$I_{1п}^* = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1ном}} = \frac{178.432}{36.486} = 4.89.$$

200. Кратность пускового момента АД с учётом вытеснения тока и насыщения при скольжении $s = 1,0$:

$$M^* = \left(\frac{I_{2п.нас}}{I_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{ном}}{s} = \left(\frac{176.812}{34.72} \right)^2 \cdot 1.702 \cdot \frac{0.027}{1} = 1.192.$$

201. Полученный в результате расчёта коэффициент насыщения:

$$k_{нас} = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1п}} = \frac{178.432}{134.239} = 1.329;$$

$$\frac{k_{нас}}{k_{нас}} = \frac{1.33}{1.329} = 1.001.$$

Данное значение отличается от принятого изначально $k_{нас} = 1.33$ на 0.1%, что допустимо и означает, что уточняющий пересчёт пусковых параметров АД не требуется (стр. 68).

202. При скольжениях меньше 0,1-0,15 влияние насыщения практически отсутствует, поэтому можно принять, что $k_{нас} = 1,0$ при $s = 0,05$ и $s = s_{кр} = 0,098$. Начальными значениями $k_{нас}$ для других скольжения из принятого расчётного ряда зададимся исходя из примерной линейной зависимости $k_{нас} = f(s)$.

Расчет произведем на ПЭВМ в математическом пакете MathCAD.

Построенные пусковые характеристики $M^* = f(s)$ и $I_{1п}^* = f(s)$ с учётом вытеснения тока и насыщения показаны на рис. 8-9.

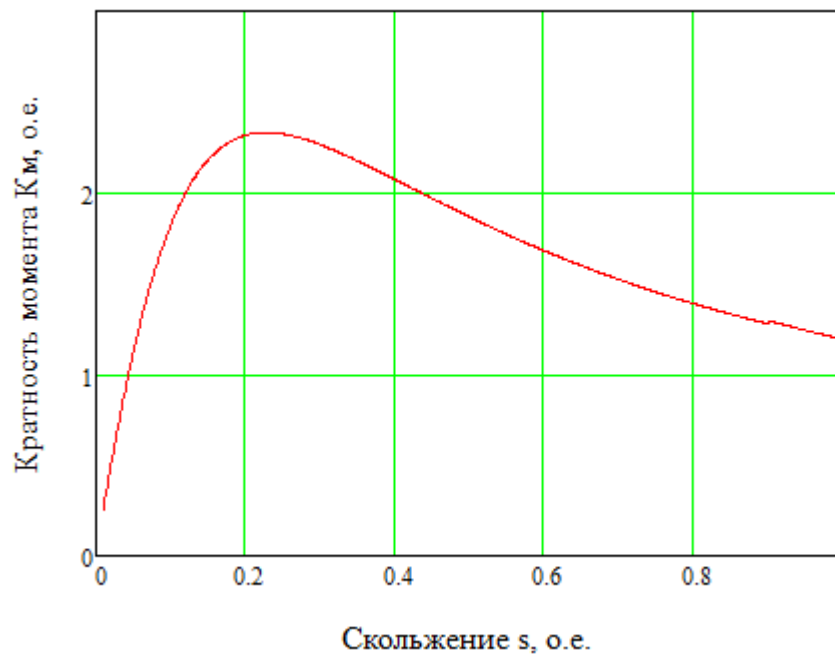


Рисунок 8 – Зависимость $M^* = f(s)$

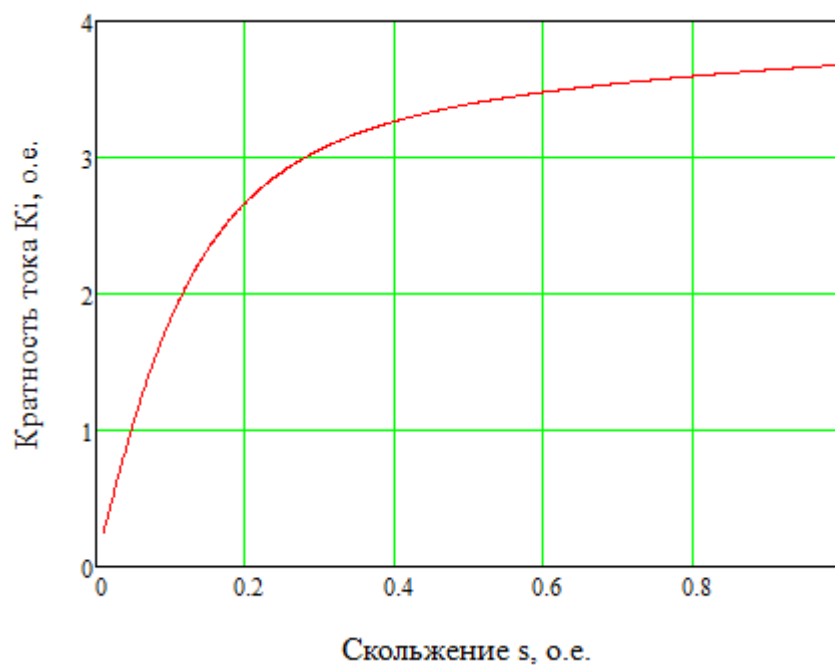


Рисунок 9 – Зависимость $I^* = f(s)$

203. По построенным пусковым характеристикам (рис. 12.2) определяем критическое скольжение и максимальный момент, соответствующий критическому скольжению:

$$s_{кр} = 0.228;$$

$$M_{кр}^* = 2.331.$$