

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:

$$h_{c2} = h_{p2} - (h_{u2} + h'_{u2}) = 29.2 - (0.7 + 1.0) = 27.5 \text{ mm}.$$

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

$$\zeta = 63.61 \cdot h_{c2} \cdot \sqrt{s} = 63.61 \cdot 0.0275 \cdot \sqrt{1} = 1.749$$

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

$$\varphi = f(\zeta) = 0.585;$$

$$\varphi' = f(\zeta) = 0.809.$$

162. Глубина проникновения тока:

$$h_p = \frac{h_{c2}}{1 + \phi} = \frac{27.5}{1 + 0.585} = 17.35 \text{ mm}$$

163. Проверяем условие (стр. 58):

$$\begin{aligned} \frac{b_1}{2} &< h_p < h_1 + \frac{b_1}{2} \\ \frac{7.7}{2} &< 17.35 < 21.3 + \frac{7.7}{2} \\ 3.85 &< 17.35 < 25.15 \end{aligned}$$

					КР.1-43.01.03.22с.09 ПЗ						
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата							
Разраб.		Гулевич			Пусковые характеристики АД				Лит	Лист	Листов
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):

$$q_p = \frac{\pi \cdot b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_p}{2} \cdot \left(h_p - \frac{b_p}{2} \right) = \frac{\pi \cdot 7.7^2}{8} + \frac{7.7 + 5.735}{2} \cdot \left(17.35 - \frac{7.7}{2} \right) = 113.968 \text{ мм}^2,$$

где по (8.7)

$$b_p = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left(h_p - \frac{b_1}{2} \right) = 7.7 - \frac{7.7 - 4.6}{21.3} \cdot \left(17.35 - \frac{7.7}{2} \right) = 5.735 \text{ мм.}$$

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

$$k_p = \frac{q_c}{q_p} = \frac{162.6}{113.968} = 1.427.$$

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

$$K_R = \frac{r_2 + r'_c \cdot (k_p - 1)}{r_2} = \frac{74.37 \cdot 10^{-6} + 39.51 \cdot 10^{-6} \cdot (1.427 - 1)}{74.37 \cdot 10^{-6}} = 1.227$$

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:

$$r'_{2\zeta} = K_R \cdot r_2 = 1.227 \cdot 0.064 = 0.079 \text{ Ом.}$$

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

$$\lambda'_{n2} = \left[\frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right) + 0,66 - \frac{b_{m2}}{2 \cdot b_1} \right] = \left[\frac{23.14}{3 \cdot 7.7} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 7.7^2}{2 \cdot 162.6} \right) + 0,66 - \frac{1.5}{2 \cdot 7.7} \right] = 1.421.$$

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

$$\lambda_{n2\zeta} = \lambda_{n2} - \lambda'_{n2\zeta} = 3.903 - 0.272 = 3.632,$$

где

$$\lambda'_{n2\zeta} = \lambda'_{n2} \cdot (1 - k_D) = 1.421 \cdot (1 - 0.809) = 0.272;$$

$$k_D = \varphi' = f(\zeta) = 0.809.$$

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

$$K_X = \frac{\lambda_{n2\zeta} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = \frac{3.632 + 2.42 + 1.034}{3.903 + 2.42 + 1.034} = 0.963.$$

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

$$x'_{2\zeta} = K_X \cdot x'_2 = 0.9633 \cdot 0.353 = 0.339 \text{ Ом}.$$

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:

$$x_{12n} = k_\mu \cdot x_{12} = 1.373 \cdot 19.668 = 26.998 \text{ Ом}.$$

172. Коэффициент c_1 в пусковом режиме АД :

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}} = 1 + \frac{0.218}{26.998} = 1.008$$

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:

$$R_\Pi = r_1 + \frac{c_{1п} \cdot r'_{2\zeta}}{s} = 0.07 + \frac{1.008 \cdot 0.079}{1} = 0.15 \text{ Ом},$$

$$X_\Pi = x_1 + c_{1п} \cdot x'_{2\zeta} = 0.218 + 1.008 \cdot 0.339 = 0.561 \text{ Ом}.$$

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

$$I'_{2п} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_\Pi^2 + X_\Pi^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.15^2 + 0.561^2}} = 379.131 \text{ А}.$$

175. Пусковой ток статора с учётом вытеснения тока:

$$I_{1п} = I_{2п} \cdot \frac{\sqrt{R_{п}^2 + (X_{п} + x_{12н})^2}}{c_{1п} \cdot x_{12н}} = 379.131 \cdot \frac{\sqrt{0.15^2 + (0.561 + 26.998)^2}}{1.008 \cdot 26.998} = 383.905 \text{ А.}$$

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

$$I_{1п}^* = \frac{I_{1п}}{I_{1ном}} = \frac{383.905}{65.081} = 5.899.$$

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

$$M^* = \left(\frac{I_{2п}}{I_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{ном}}{s} = \left(\frac{379.131}{62.269} \right)^2 \cdot 1.227 \cdot \frac{0.019}{1} = 0.867.$$

где $I_{2ном} = 62.269 \text{ А}$ – значение приведённого тока ротора при номинальном скольжении $s_{ном} = 0.019$ (определено по расчетам п.7).

178. Предварительно значение критического скольжения можно оценить по формуле:

$$s_{кр} = \frac{r_2}{\frac{x_1}{c_{1п}} + x_2} = \frac{0.064}{\frac{0.218}{1.008} + 0.353} = 0.113.$$

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.

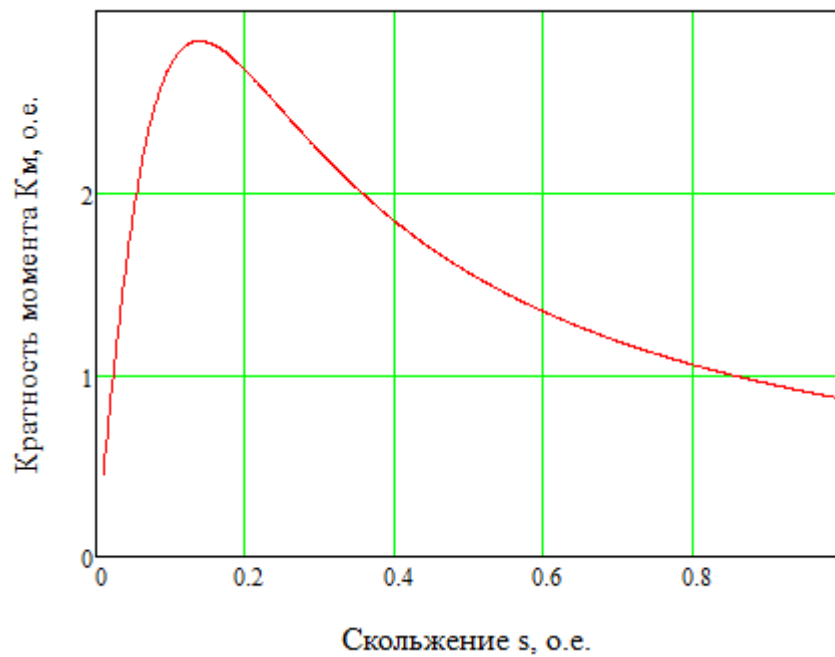


Рисунок 6 – Зависимость $M^* = f(s)$

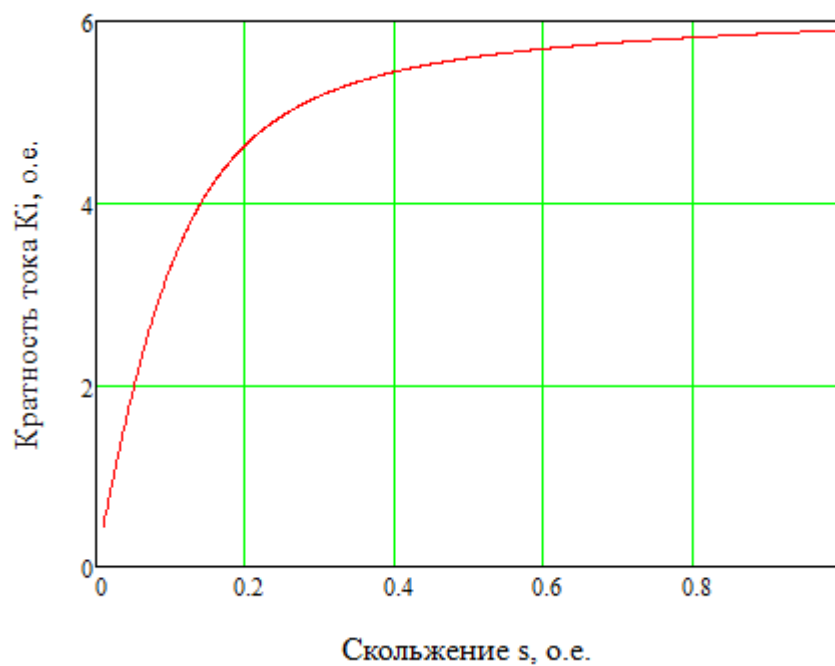


Рисунок 7 – Зависимость $I^* = f(s)$

По построенным пусковым характеристикам (рис. 12.2) уточняем, что $s_{кр} = 0.139$.

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

$$M_{\max}^* = \left(\frac{I_{2п}}{I_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{кр}}{s} = \left(\frac{379.131}{62.269} \right)^2 \cdot 1.227 \cdot \frac{0.139}{1} = 2.834.$$

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 $s = 1,0$:

$$I_{1паза} = \frac{I_{1п} \cdot u_n}{a} = \frac{383.905 \cdot 20}{2} = 3839 \text{ A}.$$

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):

$$k_{нас} = 1.167.$$

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

$$\begin{aligned} F_{n.ср} &= 0.7 \cdot \frac{k_{нас} \cdot I_{1п} \cdot u_n}{a} \cdot \left(k_{\beta} + k_y \cdot k_{обм1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) \\ &= 0.7 \cdot \frac{1.167 \cdot 384 \cdot 20}{2} \cdot \left(0.833 + 0.97 \cdot 0.928 \cdot \frac{36}{43} \right) = 4978 \text{ A}. \end{aligned}$$

183. Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n.ср}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-3} = \frac{4978}{1.6 \cdot 1.0 \cdot 1.089} \cdot 10^{-3} = 2.857 \text{ Тл},$$

где коэффициент

$$C_N = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{1.0}{17 + 14}} = 1.089.$$

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

$$K_\delta = f(B_{\phi,\delta}) = f(2.857) = 0.735.$$

185. Дополнительное эквивалентное раскрытие пазов статора:

$$c_{\varepsilon 1} = (t_{z1} - b_{ш1}) \cdot (1 - K_\delta) = (17 - 4.0) \cdot (1 - 0.735) = 3.448 \text{ мм.}$$

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

$$\Delta\lambda_{n1.нас} = \frac{h_{ш1} + 0.58 \cdot h_k}{b_{ш1}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 1}}{c_{\varepsilon 1} + 1.5 \cdot b_{ш1}} = \frac{1 + 0.58 \cdot 3.4}{4.0} \cdot \frac{3.448}{3.448 + 1.5 \cdot 4.0} = 0.271.$$

187. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора при насыщении:

$$\lambda_{n1.нас} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1.нас} = 1.419 - 0.271 = 1.148.$$

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

$$\lambda_{\partial 1.нас} = \lambda_{\partial 1} \cdot K_\delta = 1.114 \cdot 0.735 = 0.818.$$

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

$$x_{1.нас} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{n1.нас} + \lambda_{\partial 1.нас} + \lambda_{\lambda 2}}{\lambda_{n1} + \lambda_{\lambda 1} + \lambda_{\lambda 2}} = 0.2183 \cdot \frac{1.148 + 0.818 + 0.92}{1.419 + 1.114 + 0.92} = 0.182 \text{ Ом.}$$

190. Дополнительное эквивалентное раскрытие пазов ротора:

$$c_{\varepsilon 2} = (t_{z2} - b_{ш2}) \cdot (1 - K_\delta) = (14 - 1.5) \cdot (1 - 0.735) = 3.316 \text{ мм.}$$

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

$$\lambda_{п2.нас} = \frac{h_{ш2} + h'_{ш2}}{b_{ш2}} \cdot \frac{c_{э2}}{b_{ш2} + c_{э2}} = \frac{0.7 + 1.0}{1.5} \cdot \frac{3.316}{3.316 + 1.5} = 0.783.$$

192. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора при насыщении:

$$\lambda_{п2\zeta.нас} = \lambda_{п2\zeta} - \Delta\lambda_{п2.нас} = 3.632 - 0.78 = 2.851.$$

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

$$\lambda_{\partial2.нас} = \lambda_{\partial2} \cdot K_{\delta} = 1.034 \cdot 0.735 = 0.76.$$

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

$$x'_{2.нас} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{п2\zeta.нас} + \lambda_{\partial2.нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0.353 \cdot \frac{2.851 + 0.76 + 2.42}{3.903 + 1.034 + 2.42} = 0.289 \text{ Ом.}$$

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

$$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1.нас}}{x_{12н}} = 1 + \frac{0.182}{26.998} = 1.007.$$

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

$$R_{п.нас} = r_1 + \frac{c_{1п.нас} \cdot r'_{2\zeta}}{s} = 0.07 + \frac{1.007 \cdot 0.079}{1} = 0.15 \text{ Ом,}$$

$$X_{п.нас} = x_{1.нас} + c_{1п.нас} \cdot x'_{2\zeta.нас} = 0.182 + 1.007 \cdot 0.289 = 0.473 \text{ Ом.}$$

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

$$I'_{2п.нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.15^2 + 0.473^2}} = 443.026 \text{ А.}$$

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

$$I_{1п.нас} = \dot{I}_{2п.нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} \cdot x_{12п}}$$

$$= 443.026 \cdot \frac{\sqrt{0.15^2 + (0.473 + 26.998)^2}}{1.007 \cdot 26.998} = 447.775 \text{ А.}$$

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

$$I_{1п}^* = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1ном}} = \frac{447.775}{65.081} = 6.88.$$

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

$$M^* = \left(\frac{\dot{I}_{2п.нас}}{\dot{I}_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{ном}}{s} = \left(\frac{443.026}{62.269} \right)^2 \cdot 1.227 \cdot \frac{0.019}{1} = 1.184.$$

201. Полученный в результате расчёта коэффициент насыщения:

$$k_{нас} = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1п}} = \frac{447.775}{383.905} = 1.116;$$

$$\frac{k_{нас}}{k_{нас}} = \frac{1.167}{1.166} = 1.001.$$

Данное значение не значительно отличается от принятого изначально $k_{нас} = 1.2$ что 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 $s = 0,05$. 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.

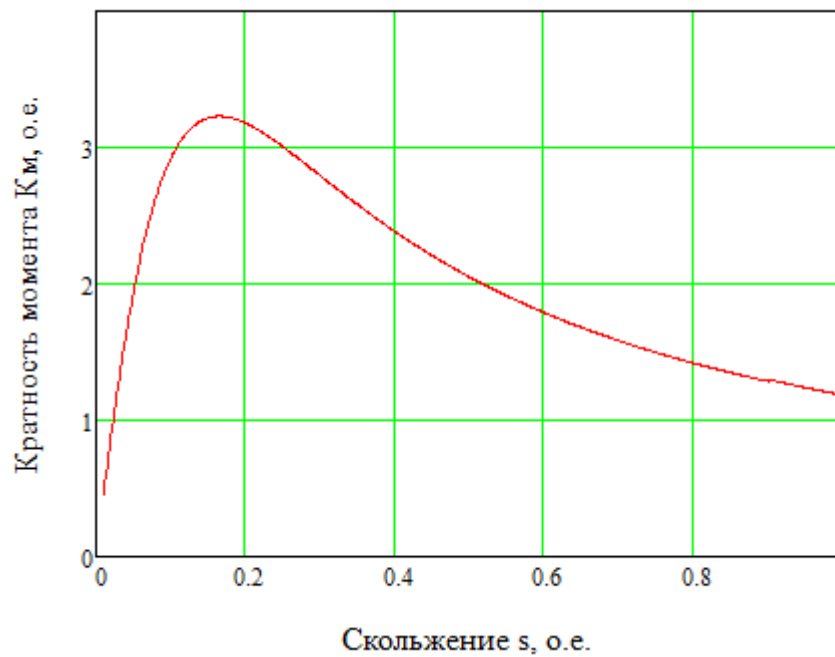


Рисунок 8 – Зависимость $M^* = f(s)$

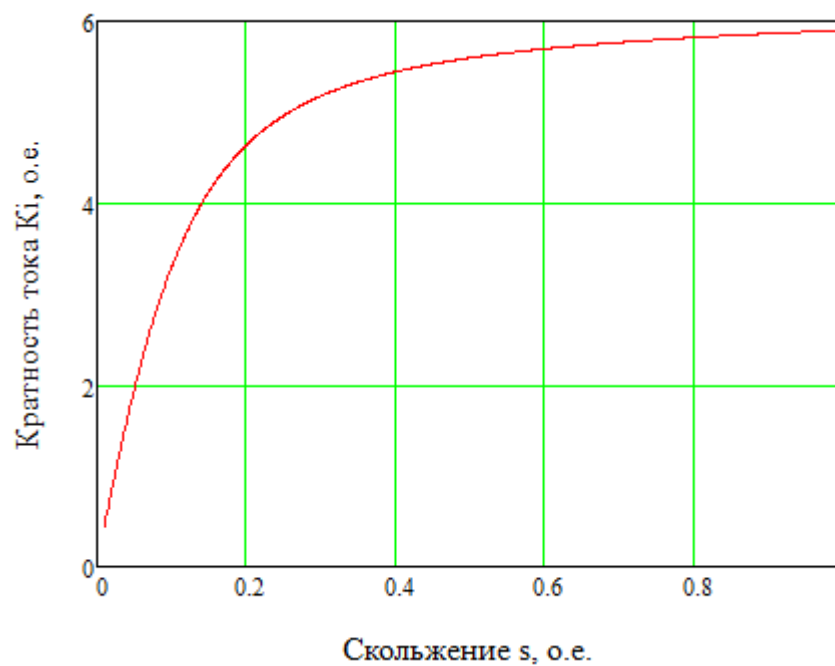


Рисунок 9 – Зависимость $I^* = f(s)$

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

$$s_{kp} = 0.165;$$

$$M_{kp}^* = 3.229.$$

					<i>КР.1-43.01.03.22с.09 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		