



Министерство науки и высшего образования Российской
Федерации Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана национальный исследовательский университет»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Модульное домашнее задание №2
ПО ДИСЦИПЛИНЕ "Электротехника"
Вариант 15

Студент группы ИУ1-31Б

Соин А. Д.
«17» декабря 2025 г.

Преподаватель

Васюков С. А.
«_____» _____ 2025 г.

Москва, 2025

Содержание

1	Исходные данные	2
2	Расчет естественных механической ($n(M)$) и электромеханической ($n(I_2)$) характеристик.	2
2.1	Механическая характеристика	2
2.2	Электромеханическая характеристика	3
2.3	Определение частоты вращения асинхронного двигателя, соответствующую заданному моменту нагрузки на валу	3
3	Расчёт искусственных механических характеристик $n(M)$ при различных способах регулирования частоты вращения трёхфазного асинхронного двигателя.	5
3.1	Расчет механической характеристики при уменьшении напряжения источника питания	5
3.2	Расчет характеристик при введении добавочного сопротивления в цепь ротора	7
3.3	Расчет механической характеристики при изменении частоты напряжения источника питания	9
4	Расчёт искусственных механических характеристик при различных способах торможения трёхфазного асинхронного двигателя.	11
4.1	Генераторное торможение	11
4.2	Торможение противовключением	13

1 Исходные данные

Номинальное напряжение двигателя, В	$U_{1н}$	220/380
Номинальная мощность двигателя, кВт	$P_{н}$	22
Номинальная скорость вращения ротора, об/мин	$n_{н}$	716
Кратность максимального момента	λ_{max}	3.0
КПД при номинальной нагрузке, %	$\eta_{н}$	87
Коэффициент мощности при номинальной нагрузке	$\cos \phi_1$	0.82
ЭДС заторможенного ротора, В	$E_{2н}$	102
Ток ротора при номинальной нагрузке, А	$I_{2н}$	140

Константы

t	q_1	q_2	h_1	h_3
0.8	0.85	3	1.05	0.25

Определим число пар полюсов двигателя по формуле $p = \frac{60f}{n_{н}}$:

$$p = \frac{60f}{n_{н}} = \frac{60 \cdot 50}{716} = 4.19 \approx 4$$

Тогда частота вращения магнитного поля в асинхронном двигателе

$$n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об/мин}$$

2 Расчет естественных механической ($n(M)$) и электромеханической ($n(I_2)$) характеристик.

2.1 Механическая характеристика

Вычислим номинальный момент двигателя

$$M_{н} = 9.55 \frac{P_{н} \eta_{н}}{n_{н}} = 9.55 \frac{22000 \cdot 0.87}{716} = 255.289 \text{ Нм}$$

Вычислим скольжение в номинальном режиме

$$s_{н} = \frac{n_0 - n_{н}}{n_0} = \frac{750 - 716}{750} = 0.047$$

Зная номинальный момент двигателя и кратность максимального момента, определим максимальный момент двигателя:

$$M_{max} = \lambda_k M_{н} = 3 \cdot 255.289 = 765.867 \text{ Нм}$$

Определим критические значения скольжения и частоты:

$$s_{кр} = s_{н} (\lambda_k + \sqrt{\lambda_k^2 - 1}) = 0.047 (3 + \sqrt{9 - 1}) = 0.277$$

$$n_{\text{н}} = n_0(1 - s_{\text{кр}}) = 750(1 - 0.277) = 542.423 \text{ об/мин}$$

Чтобы определить соотношение между моментом двигателя и скольжением используем формулу Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}$$

Связь между скоростью вращения и скольжением

$$n = n_0(1 - s)$$

2.2 Электромеханическая характеристика

Определим угловую скорость вращения магнитного поля в двигателе

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{60} n_0 = \frac{2 \cdot 3.14}{60} 750 = 78.540 \text{ рад/с}$$

Определим активное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$R_2 = \frac{M_{\text{н}} \Omega_0 s_{\text{н}}}{3I_{2\text{н}}^2} = \frac{255.289 \cdot 78.540 \cdot 0.047}{3 \cdot 140^2} = 0.016 \text{ Ом}$$

Для определения связи между током в обмотке ротора, моментом и скольжением используем следующую формулу

$$I_2 = \sqrt{\frac{M \Omega_0 s}{3R_2}}$$

2.3 Определение частоты вращения асинхронного двигателя, соответствующую заданному моменту нагрузки на валу

Заданный момент нагрузки

$$M_D = t M_{\text{н}} = 0.8 \cdot 255.289 = 204.231 \text{ Нм}$$

Коэффициент нагрузки при данном моменте

$$\lambda_D = \frac{M_{\text{max}}}{M_D} = \frac{579.340}{204.231} = 2.837$$

Найдем скольжение и частоту вращения при данном моменте

$$s_D = \frac{s_{\text{кр}}}{(\lambda_D + \sqrt{\lambda_D^2 - 1})} = \frac{0.277}{2.837 + \sqrt{2.837^2 - 1}} = 0.038$$

$$n_D = n_0(1 - s_D) = 750(1 - 0.038) = 721.813 \text{ об/мин}$$

Значения вычисленные для построения графиков

	s	n	M	I_2
Холостой ход	0,0000	750,0000	0,0000	0,0000
	0,0100	742,5000	55,2713	29,8936
	0,0200	735,0000	110,1119	59,6707
Искомая точка	0,0376	721,8128	204,2313	111,4001
	0,0400	720,0000	216,8445	118,4222
Номинальный режим	0,0475	714,3855	255,2891	140,0000
	0,0600	705,0000	317,1554	175,4045
	0,1000	675,0000	489,5283	281,3312
	0,1400	645,0000	616,9489	373,6952
	0,2100	592,5000	737,5801	500,4298
Критический режим	0,2768	542,4233	765,8673	585,4157
	0,3000	525,0000	763,3864	608,5017
	0,4000	450,0000	716,7112	680,8180
	0,5000	375,0000	649,0128	724,3369
	0,6000	300,0000	582,5957	751,7756
	0,7000	225,0000	523,7469	769,9078
	0,8000	150,0000	473,2748	782,4032
	0,9000	75,0000	430,3433	791,3302
Пусковой режим	1,0000	0,0000	393,7731	797,9064

Полученный график

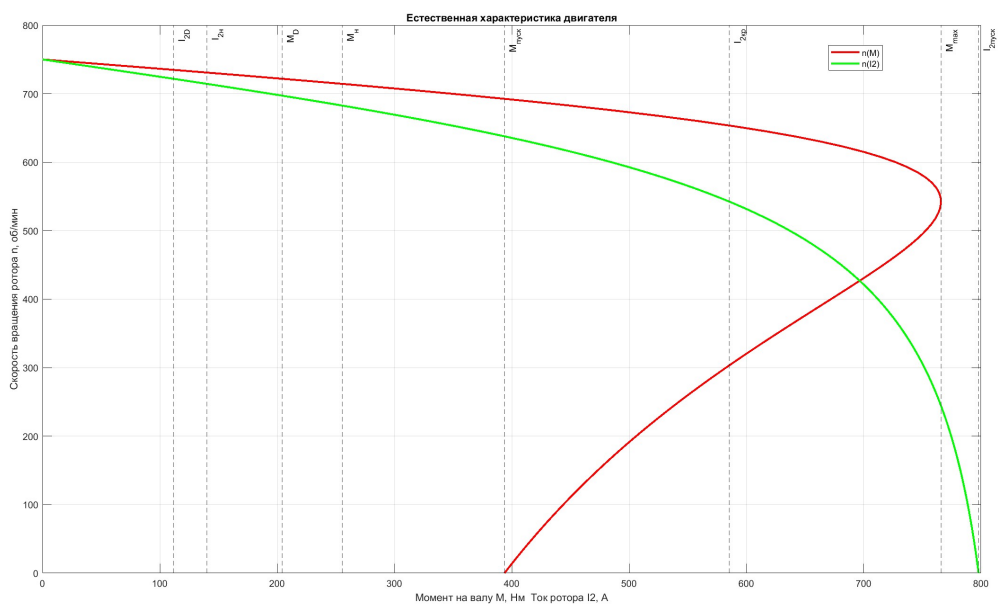


Рис. 1. Естественные характеристики асинхронного двигателя

3 Расчёт искусственных механических характеристик $n(M)$ при различных способах регулирования частоты вращения трёхфазного асинхронного двигателя.

3.1 Расчет механической характеристики при уменьшении напряжения источника питания

Используя константу q_1 найдем механические характеристики при пониженном напряжении

$$U'_1 = U_1 q_1$$

$$M'_{max} = M_{max} q_1^2 = 765.867 \cdot 0.85^2 = 553.339$$

$$n'_{кр} = n_{кр} = 542.423$$

$$s'_{кр} = s_{кр} = 0.277$$

Определим коэффициент нагрузки, скольжение и скорость при данной нагрузке

$$\lambda'_D = \frac{M'_{max}}{M_D} = \frac{553.339}{204.231} = 2.709$$

$$s'_D = \frac{s'_{кр}}{(\lambda'_D + \sqrt{\lambda'^2_D - 1})} = \frac{0.277}{2.709 + \sqrt{2.709^2 - 1}} = 0.053$$

$$n'_D = n_0(1 - s'_D) = 750(1 - 0.053) = 710.291 \text{ об/мин}$$

Коэффициент регулирования

$$k'_D = \frac{n'_D}{n_D} = \frac{710.291}{721.813} = 0.984$$

Значения вычисленные для построения графиков

	s'	n'	M'
Холостой ход	0,0000	750,0000	0,0000
	0,0100	742,5000	39,9335
	0,0200	735,0000	79,5559
	0,0300	727,5000	118,5639
Искомая точка	0,0529	710,2910	204.2313
	0,1000	675,0000	353,6842
	0,1600	630,0000	479,5163
	0,2200	585,0000	539,0733
Критический режим	0,2768	542,4233	553,3391
	0,3000	525,0000	551,5467
	0,4000	450,0000	517,8238
	0,5000	375,0000	468,9118
	0,6000	300,0000	420,9254
	0,7000	225,0000	378,4072
	0,8000	150,0000	341,9410
	0,9000	75,0000	310,9231
Пусковой режим	1,0000	0,0000	284,5010

Полученный график

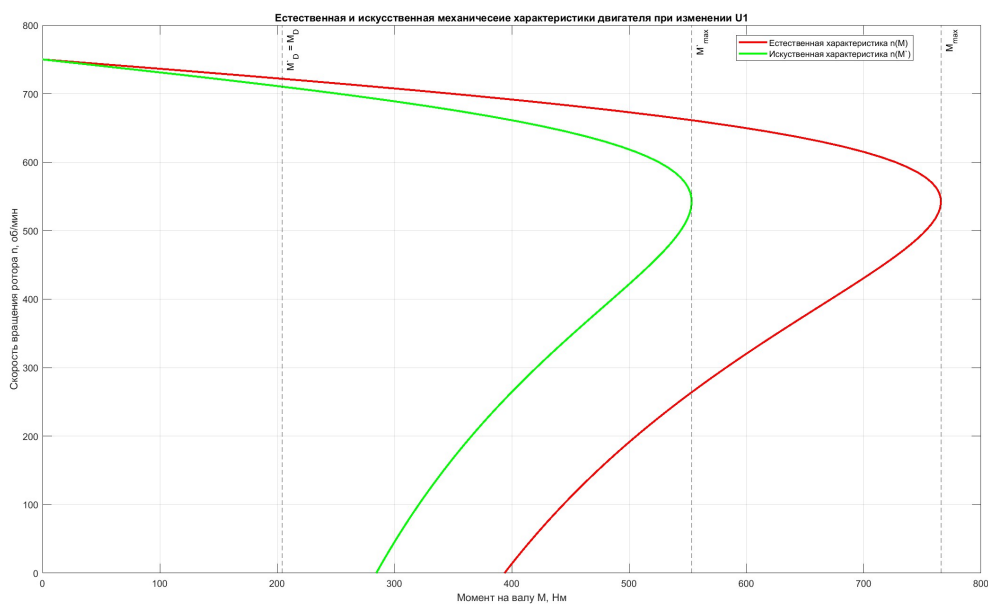


Рис. 2. Естественная и искусственная характеристики асинхронного двигателя при изменении напряжения

Данный способ регулирования подходит для понижения момента на валу, для его повышения он не подходит из-за конструктивных особенностей двигателя.

3.2 Расчет характеристик при введении добавочного сопротивления в цепь ротора

Добавочное сопротивление

$$R_{2\text{доб}} = q_2 R_2 = 3 \cdot 0.016 = 0.049 \text{ Ом}$$

Тогда

$$M'_{max} = M_{max} = 765.867$$

$$s'_{кр} = s_{кр} \frac{R'_2}{R_2} = 0.83$$

$$n'_{кр} = n_0(1 - s'_{кр}) = 127.27$$

Определим коэффициент нагрузки, скольжение и скорость при данной нагрузке

$$\lambda'_D = \frac{M'_{max}}{M_D} = \frac{765.867}{255.289} = 3.75$$

$$s'_D = \frac{s'_{кр}}{(\lambda'_D + \sqrt{\lambda'^2_D - 1})} = \frac{0.83}{3.75 + \sqrt{3.75^2 - 1}} = 0.113$$

$$n'_D = n_0(1 - s'_D) = 750(1 - 0.113) = 665.438 \text{ об/мин}$$

Коэффициент регулирования

$$k'_D = \frac{n'_D}{n_D} = \frac{665.438}{710.291} = 0.922$$

Значения вычисленные для построения графиков

	s'	n'	M'
Холостой ход	0,0000	750,0000	0,0000
	0,0200	735,0000	36,8742
	0,0500	712,5000	91,9058
	0,0800	690,0000	146,2251
	0,1100	667,5000	199,4258
Искомая точка	0,1127	665,4383	204,2313
	0,2000	600,0000	348,7232
	0,3000	525,0000	489,5283
	0,4000	450,0000	598,9149
	0,5000	375,0000	676,9199
	0,6000	300,0000	727,1575
	0,7000	225,0000	754,8412
	0,8000	150,0000	765,3382
Критический режим	0,8303	127,2700	765,8673
	0,8700	97,5000	765,0330
	0,9400	45,0000	760,0089
Пусковой режим	1,0000	0,0000	752,8132

Полученный график

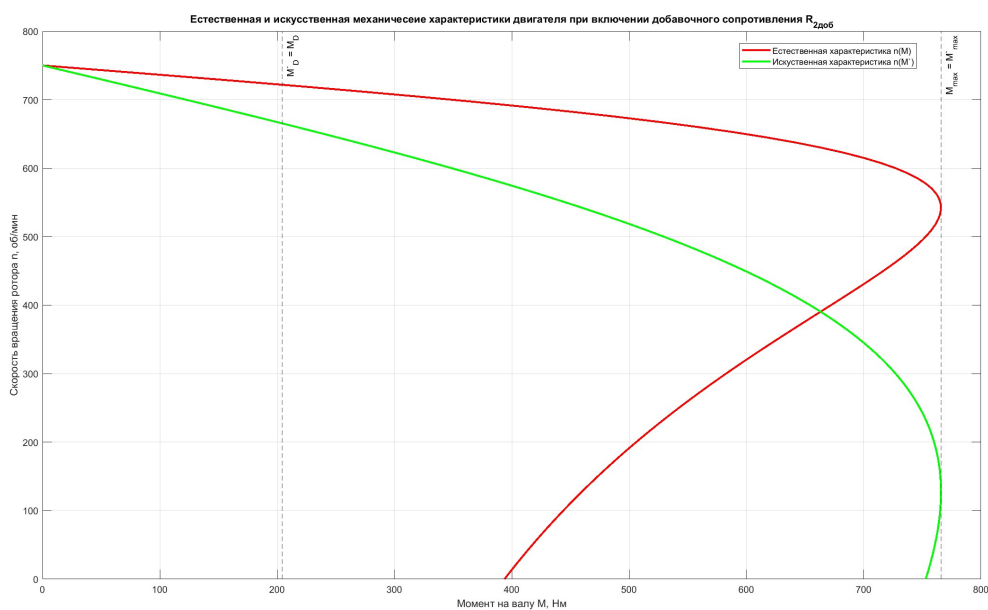


Рис. 3. Естественная и искусственная характеристики асинхронного двигателя при включении добавочного сопротивления

Регулирование асинхронного двигателя при помощи добавления сопротивления в цепь ротора позволяет снизить скорость вращения, однако сопровождается заметным снижением КПД и ростом тепловых потерь. Этот метод целесообразен лишь для кратковременных режимов.

3.3 Расчет механической характеристики при изменении частоты напряжения источника питания

Рассмотрим, как влияет изменение f_1 на величину момента M_{max} . При $U_1 = \text{const}$: $M_{max} \propto \frac{1}{f^2}$. Обычно при регулировании частоты вращения желательно, чтобы максимальный момент оставался неизменным. Для этого одновременно с изменением частоты напряжения необходимо изменять и напряжение так, чтобы выполнялось равенство $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$. Определим значения изменившихся характеристик:

$$n'_0 = n_0 \cdot \frac{f}{f'} = n_0 q_1 = 750 \cdot 0.85 = 637.500 \text{ об/мин}$$

$$\Delta n = n_0 - n'_0 = 750 - 637.500 = 112.500 \text{ об/мин}$$

$$n'_{кр} = n_{кр} - \Delta n = 542.423 - 112.500 = 429.923 \text{ об/мин}$$

$$s'_{кр} = \frac{n'_0 - n'_{кр}}{n'_0} = \frac{637.5 - 429.923}{637.5} = 0.326$$

Скорость вращения и скольжение при данном моменте

$$n'_D = n_D - \Delta n = 721.813 - 112.500 = 609.313 \text{ об/мин}$$

$$s'_D = \frac{n'_0 - n'_D}{n'_0} = \frac{637.5 - 609.313}{637.5} = 0.044$$

Коэффициент регулирования

$$k'_D = \frac{n'_D}{n_D} = \frac{609.313}{721.813} = 0.844$$

Значения вычисленные для построения графиков

	s'	n'	M'
Холостой ход	0,0000	637,5000	0,0000
	0,0200	624,7500	93,7302
	0,0400	612,0000	185,3703
Искомая точка	0,0442	609,3128	204,2313
	0,0500	605,6250	229,7912
	0,1100	567,3750	464,4545
	0,1700	529,1250	628,4164
	0,2300	490,8750	721,8139
	0,2900	452,6250	760,7590
Критический режим	0,3256	429,9233	765,8673
	0,4000	382,5000	749,9357
	0,4800	331,5000	711,6042
	0,5600	280,5000	665,5972
	0,6400	229,5000	619,0565
	0,7200	178,5000	575,0903
	0,8000	127,5000	534,8354
	0,8800	76,5000	498,5097
	0,9600	25,5000	465,9289
Пусковой режим	1,0000	0,0000	450,9393

Полученный график

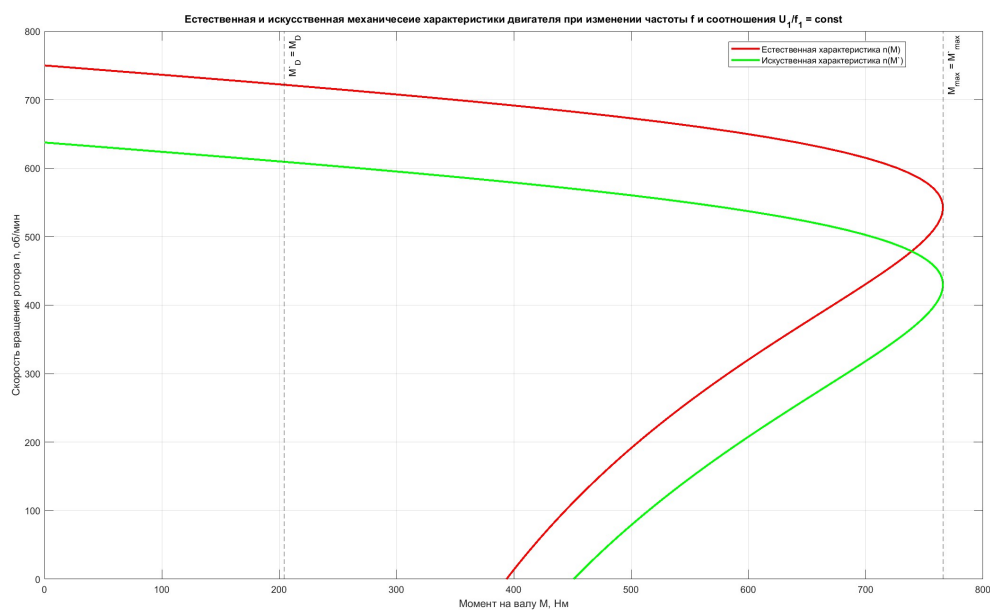


Рис. 4. Естественная и искусственная характеристики асинхронного двигателя при изменении частоты напряжения

Метод частотного регулирования обеспечивает наибольшие возможности управления параметрами двигателя, практически не изменяя форму характеристики, что делает его наиболее распространённым. Недостатком данного метода является необходимость использовать внешнее устройство – частотный преобразователь. Если срав-

нивать три рассматриваемых метода регулирования скорости асинхронного двигателя, то можно отметить, что методы понижения напряжения на источнике питания и добавления сопротивления в цепь ротора не изменяют частоту вращения магнитного поля статора, в отличие от метода частотного преобразования, обеспечивающего широкий диапазон регулирования. Кроме того, методы добавления сопротивления в цепь ротора и частотного регулирования сохраняют величину максимального момента, тогда как снижение напряжения питания приводит к его уменьшению и ухудшению перегрузочной способности двигателя.

4 Расчёт искусственных механических характеристик при различных способах торможения трёхфазного асинхронного двигателя.

4.1 Генераторное торможение

Рассмотрим работу асинхронного двигателя в режиме в тормозном режиме, на естественной характеристике ($R_{доб} = 0$).

Тормозной момент

$$M_T = -tM_n = -0.8 \cdot 255.289 = -204.231$$

Скорость при торможении

$$n_T = h1n_n = 1.25 \cdot 716 = 751.800$$

Максимальный тормозной момент

$$M_{maxT} = -M_{max} = -765.867$$

Критическое скольжение

$$s_{крTE} = -s_{кр} = -0.277$$

Коэффициент нагрузки при данном моменте

$$\lambda_D = \frac{M_{maxT}}{M_T} = \frac{-765.867}{-204.231} = 3.75$$

Найдем скольжение и частоту вращения при данном моменте

$$s_{TE} = \frac{s_{крTE}}{(\lambda_T + \sqrt{\lambda_T^2 - 1})} = \frac{-0.277}{3.75 + \sqrt{3.75^2 - 1}} = -0.038$$

$$n_{TE} = n_0(1 - s_{TE}) = 750(1 + 0.038) = 778.187 \text{ об/мин}$$

Теперь рассмотрим второй этап - определение добавочного сопротивления, обеспечивающего прохождение через заданную точку с координатам M_T и n_T .

$$s_T = \frac{n_0 - n_T}{n_0} = \frac{750 - 751.8}{750} = -0.002$$

Тогда требуемое добавочное сопротивление

$$R_{2\text{доб}} = R_2 \left(\frac{s_T}{s_{TE}} - 1 \right) = 0.016 \left(\frac{-0.002}{-0.038} - 1 \right) = -0.015 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение и скорость при прохождении через точку

$$s_{\text{крТ}} = s_{\text{крТЕ}} \frac{R_2 + R_{2\text{доб}}}{R_2} = -0.277 \frac{0.016 - 0.015}{0.16} = -0.018$$

$$n_{\text{крТ}} = n_0(1 - s_{\text{крТ}}) = 750(1 + 0.018) = 763.256 \text{ об/мин}$$

Значения вычисленные для построения графиков

	s	n	М	М'
Искусственная критическая точка	-1,5100	1882,5000	-271,6272	-17,9260
	-1,4000	1800,0000	-291,4224	-19,3341
	-1,1000	1575,0000	-362,4512	-24,6046
	-0,8000	1350,0000	-473,2748	-33,8235
	-0,5000	1125,0000	-649,0128	-54,0765
Естественная критическая точка	-0,2768	957,5767	-765,8673	-97,4173
Искусственная искомая точка	-0,0177	763,2556	-97,4173	-765,8673
	-0,0100	757,5000	-55,2713	-656,4925
Естественная искомая точка	-0,0376	778,1872	-204,2313	-589,8745
Холостой ход	0,0000	750,0000	0,0000	0,0000
	0,1000	675,0000	489,5283	262,5199
	0,2000	600,0000	727,1575	134,3113
	0,3000	525,0000	763,3864	89,9280
	0,4000	450,0000	716,7112	67,5482
	0,5000	375,0000	649,0128	54,0765
	0,6000	300,0000	582,5957	45,0809
	0,7000	225,0000	523,7469	38,6497
	0,8000	150,0000	473,2748	33,8235
	0,9000	75,0000	430,3433	30,0684
Остановка/Пуск	1,0000	0,0000	393,7731	27,0636

Полученный график

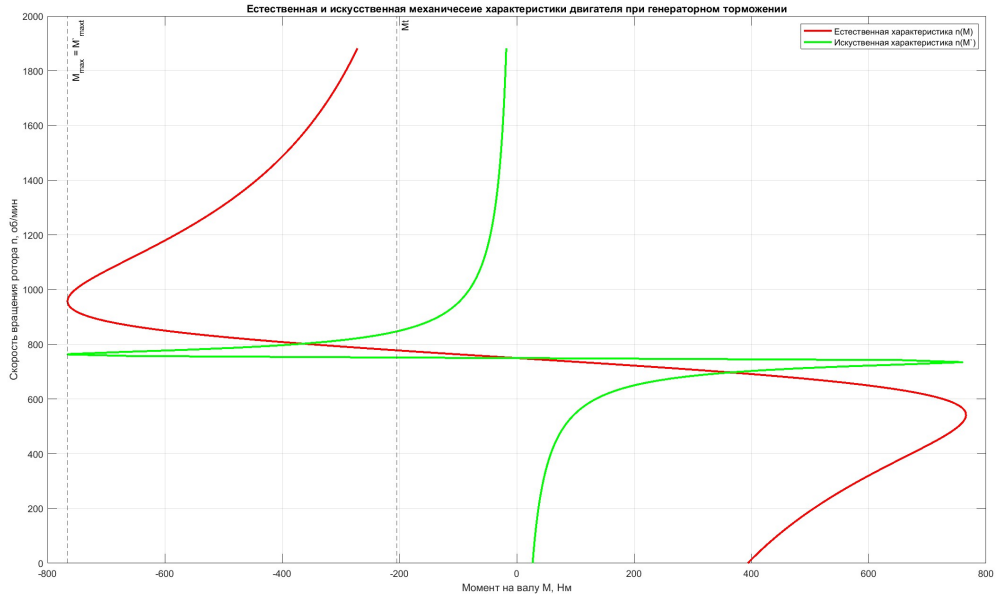


Рис. 5. Естественная и искусственная характеристики асинхронного двигателя при генераторном торможении

Метод генераторного торможения позволяет экономить энергию и обеспечивает быстрое торможение, что делает его полезным в системах, требующих точного контроля процесса останова. Однако он требует дополнительного оборудования и может быть неэффективен для небольших двигателей или случаев, когда возврат энергии в сеть невозможен.

4.2 Торможение противовключением

Рассмотрим торможение противовключением с использованием реостатной характеристики

Тормозной момент

$$M_T = tM_n = 0.8 \cdot 255.289 = 204.231$$

Скорость и скольжение при торможении

$$n_T = -h3n_n = -0.25 \cdot 716 = -179.000$$

$$s_T = \frac{n_0 - n_T}{n_0} = \frac{750 + 179}{750} = 1.239$$

$$\lambda_T = \frac{M_{max}}{M_T} = \frac{765.867}{204.231} = 3.75$$

Критическое скольжение и скорость при торможении

$$s_{крТ} = s_T(\lambda_T + \sqrt{\lambda_T^2 - 1}) = 1.239(3.75 + \sqrt{3.75^2 - 1}) = 9.122$$

$$n_{крГ} = n_0(1 - s_{крГ}) = 750(1 - 9.122) = -6091.349 \text{ об/мин}$$

Добавочное сопротивление

$$R_{2доб} = R_2 \left(\frac{s_{крГ}}{s_{кр}} - 1 \right) = 0.016 \left(\frac{9.122}{1.239} - 1 \right) = 0.517 \text{ Ом}$$

Значения вычисленные для построения графиков

	s	n	M	M'
Холостой ход	0,0000	750,0000	0,0000	0,0000
	0,2500	562,5000	761,9220	41,9485
	0,5000	375,0000	649,0128	83,7086
	0,7500	187,5000	497,4994	125,0945
Остановка/Пуск	1,0000	0,0000	393,7731	165,9261
Номинальный режим	1,2387	-179,0000	325,9776	204,2313
	2,0000	-750,0000	207,9853	320,4362
	3,0000	-1500,0000	140,1196	454,5905
	4,5000	-2625,0000	93,8531	607,7371
	6,0000	-3750,0000	70,5061	703,2548
	7,5000	-4875,0000	56,4480	751,4227
	8,9000	-5925,0000	47,5873	765,6353
Искусственная критическая точка	9,1218	-6091,3493	46,4324	765,8673

Полученный график

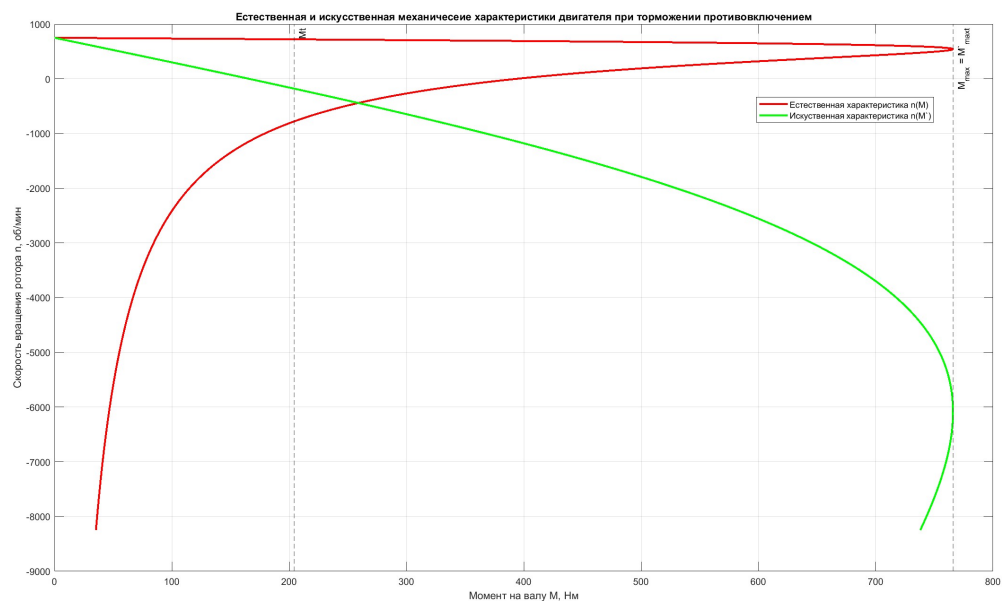


Рис. 6. Естественная и искусственная характеристики асинхронного двигателя при торможении противовключением

Торможение противовключением отличается простотой реализации и высокой

эффективностью при больших скоростях вращения, однако сопровождается значительными механическими нагрузками, повышенным тепловыделением и неэкономичным расходом энергии. Этот метод целесообразен для экстренных или аварийных режимов, где необходимо быстрое торможение, но требует учёта возможного износа и повреждения оборудования.