

Практическая работа № 2

Расчет естественной и искусственных механических характеристик асинхронного двигателя

Цель работы: Закрепить теоретические знания по определению свойств электродвигателей электроприводов по их механическим характеристикам. Освоить методику расчета искусственных механических характеристик электроприводов в двигательном и генераторном режимах.

Методические указания

Трехфазный АД имеет обмотку статора, подключаемую к трехфазной сети переменного тока с напряжением U_1 и частотой f_1 и обмотку ротора. Обмотка ротора может быть выполнена аналогично обмотки статора из проводников с выводами на три контактных кольца. Такая конструкция соответствует АД с фазным ротором что позволяет включать в роторную цепь различные электротехнические элементы, например, резисторы для регулирования скорости, тока и момента ЭП, и создавать специальные схемы включения АД. Большинство АД выполняется с короткозамкнутой обмоткой ротора, без внешних выводов

В асинхронном двигателе (АД) электрическая мощность P_1 , потребляемая от сети переменного тока, преобразуется в механическую мощность P_2 , отдаваемую нагрузке на валу двигателя. Под действием приложенного к обмотке статора АД переменного напряжения U_1 по ней протекает ток I_1 , реактивная составляющая которого I_μ создает вращающийся магнитный поток Φ . Этот поток наводит в короткозамкнутой обмотке ротора ЭДС E_2 , под воздействием которой по обмотке протекает ток I_2 .

В результате взаимодействия тока обмотки ротора I_2 с магнитным потоком Φ создается вращающий момент, направленный в сторону вращения магнитного поля:

$$M = C_M \Phi I_2 \cos \psi_2, \quad (1)$$

где C_M – постоянный коэффициент, зависящий от параметров АД;

ψ_2 – фазовый сдвиг между векторами ЭДС E_2 и током обмотки ротора I_2 .

Угловая скорость вращения ротора АД Ω определяется по формуле

$$\Omega = \omega_1 (1 - s), \quad (2)$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1 / p_{\text{п}}$ – угловая скорость вращения магнитного поля, созданного током I_{μ} ;

$s = (\omega_1 - \Omega) / \omega_1$ – скольжение АД; (3)

f_1 – частота питающего напряжения;

$p_{\text{п}}$ – число пар полюсов АД.

Электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$, передаваемая через воздушный зазор со статора на ротор, равна потребляемой мощности P_1 за вычетом потерь в стали магнитопровода ΔP_c и электрических потерь в обмотке статора ΔP_1 :

$$P_{\text{эм}} = P_1 - \Delta P_c - \Delta P_1. \quad (4)$$

Механическая мощность P_2 , отдаваемая двигателем нагрузке, равна разности между электромагнитной мощностью $P_{\text{эм}}$ и мощностью потерь в обмотке ротора ΔP_2 и механических потерь $\Delta P_{\text{мех}}$:

$$P_2 = P_{\text{эм}} - \Delta P_2 - \Delta P_{\text{мех}}. \quad (5)$$

Если пренебречь механическими потерями, то мощность P_2 можно определить через электромагнитную мощность:

$$P_2 = (1 - s) P_{\text{эм}}. \quad (6)$$

Электрические потери мощности в цепи обмотки ротора ΔP_2 , которые часто называют потерями скольжения, без учета механических потерь представляют собой разность электромагнитной $P_{\text{эм}} = M \omega_1$ и полезной механической мощности $P_2 = M \Omega$, т. е.

$$\Delta P_2 = P_{эм} - P_2 = M\omega_1 - M\Omega = M\omega_1 s = P_{эм} s. \quad (7)$$

Потери мощности в роторе, выраженные через электрические параметры ротора, определяются как

$$\Delta P_2 = 3(I_2')^2 R_2'. \quad (8)$$

где I_2' – ток обмотки ротора, приведенный к параметрам обмотки статора;
 R_2' – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к параметрам обмотки статора.

Приравняв (7) и (8), получим

$$M = 3(I_2')^2 R_2' / (\omega_1 s). \quad (9)$$

Отсюда видно, что электромагнитный момент прямо пропорционален потерям в обмотке ротора, которые зависят от величины скольжения.

Определим коэффициент полезного действия АД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(1-s)P_{эм}}{P_{эм} + \Delta P_{ст} + \Delta P_1}. \quad (10)$$

Из (10) следует очевидное неравенство

$$\eta < (1-s).$$

Таким образом, КПД АД будет наибольшим только при малых значениях скольжения.

Характер зависимости КПД АД от нагрузки аналогичен соответствующим зависимостям для электрических машин других типов. Максимум КПД АД малой и средней мощности составляет 0,7 – 0,9, для машин большой мощности он равен 0,94 – 0,96.

Для построения электромеханической характеристики АД анализируем характерные точки этой характеристики и ее асимптоты, придавая скольжению s и скорости Ω различные значения в пределах $\pm\infty$:

$s = 0, \Omega = \omega_1, I_2' = 0$ – точка идеального холостого хода;

$s = 1, \Omega = 0, I_2' = I_{кз} = U_{\phi} / \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + x_{\kappa}^2}$ – точка короткого замыкания;

$s_1 = -R_2'/R_1, \Omega = \omega_1(1+s_1), I_2' = I_{\max} = U_{\phi}/x_{\kappa}$ – точка максимального значения тока ротора, лежащая в области отрицательных скольжений;

$R_1 + R_2' = R_{\kappa}$ – активное сопротивление короткого замыкания АД;

$x_1 + x_2' = x_{\kappa}$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания АД.

При $s \rightarrow \pm\infty, \Omega \rightarrow \pm\infty, I_2' \rightarrow I_{\infty} = U_{\phi} / \sqrt{R_1^2 + x_{\kappa}^2}$ – асимптотическое значение тока ротора при бесконечно большом увеличении скольжения и скорости.

При $0 < s < 1$ ток обмотки ротора, приведенный к параметрам обмотки статора определяется по формуле:

$$I_2' = U_{\phi} / \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\kappa}^2}. \quad (11)$$

Подставив в (9) значение тока I_2' из (11), получим формулу электромагнитного момента трехфазного АД:

$$M = \frac{3U_{\phi}^2 R_2'}{\omega_1 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\kappa}^2 \right]}; \quad (12)$$

На рис.1 показана электромеханическая характеристика АД, причем по вертикальной оси указаны соответствующие друг другу скорость и скольжение АД, связанные соотношением (2).

Исследовав полученную зависимость $M(s)$ на экстремум, т. е. взяв производную dM/ds и приравняв ее нулю, обнаружим наличие двух экстремальных точек момента и скольжения:

$$M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_1 \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2} \right)}; \quad (13)$$

$$s_k = \pm R_2' / \sqrt{R_1^2 + x_k^2}. \quad (14)$$

Причем знак «плюс» здесь относится к области скольжения $s > 0$, а знак «минус» – к области $s < 0$. Значения момента M_k и скольжения s_k АД, соответствующие экстремальным точкам, получили название критических.

На рис.2 приведена механическая характеристика АД. Отметим, что она соответствует определенному чередованию фаз питающего напряжения сети U_1 на зажимах статора АД. При изменении порядка чередования двух фаз АД направление вращения поля статора изменится на противоположное, что заставит ротор вращаться в противоположную сторону. При этом механическая характеристика будут иметь вид аналогичный механической характеристики при прямом вращении поля статора, но расположена симметрично относительно начала координат.

На практике находят применение упрощенная формула расчета механической характеристики АД, которую называют формулой Клосса.

$$M = 2M_k / (s/s_k + s_k/s); \quad (15)$$

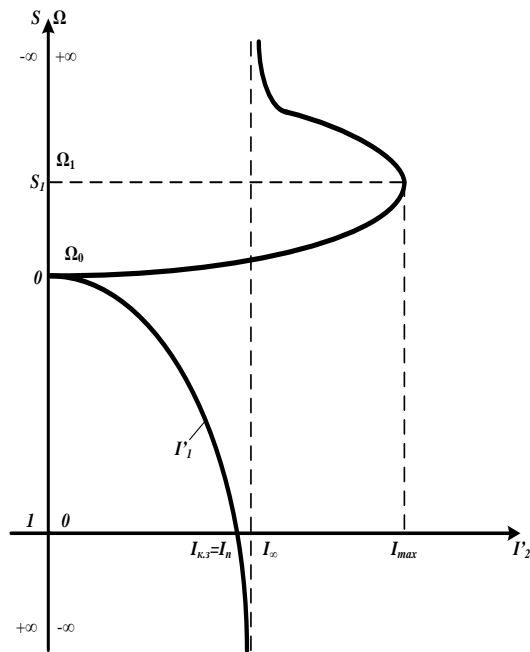


Рис.1 Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя

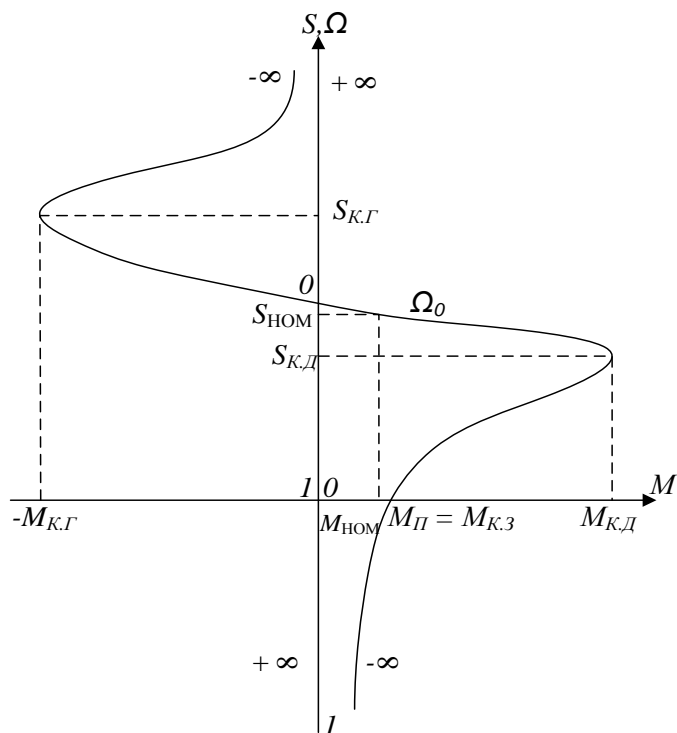


Рис. 2 Механическая характеристика асинхронного двигателя

Так из (11) следует, что регулирование (ограничение) токов в роторе и статоре в переходных режимах может быть обеспечено изменением подводимого к статору АД напряжения, а также с помощью добавочных резисторов в цепях статора и ротора.

Формулы (2) и (12) определяют возможные способы получения искусственных механических характеристик, требуемых при регулировании момента и скорости АД, а именно:

- изменение уровня и частоты подводимого к двигателю напряжения;
- включение в цепи статора и ротора добавочных активных и реактивных резисторов;
- изменение числа пар полюсов магнитного поля АД.

Применяются и другие способы регулирования скорости вращения, реализуемые с помощью специальных схем включения АД, например, каскадные схемы, схемы электрического вала.

Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением напряжения обмотки статора

Изменение величины напряжения, подводимого к статору АД, позволяет с помощью относительно простых схем управления осуществлять в статических и динамических режимах регулирование его скорости вращения с хорошими технико-экономическими показателями.

На рис. 3 приведены механические характеристика АД, построенные по формуле (13) для нескольких значений напряжения, подаваемого на обмотку статора, $U_{13} < U_{12} < U_{1N}$.

При постоянном значении момента нагрузки $M_c = \text{const}$ уменьшение напряжения, подаваемого на обмотку статора, приводит к увеличению скольжения s , а значит к уменьшению угловой скорости вращения (см. формулу (2)).

Из рис. 3 видно, что при уменьшении напряжения, подаваемого на обмотку статора, происходит уменьшение критического момента, в то же

время величина критического скольжения остается неизменной. В результате при $U_{\text{пер}} = \text{var}$ искусственные характеристики при напряжениях меньших номинального оказываются малоприспособными для регулирования скорости из-за уменьшения перегрузочной способности АД. Диапазон регулирования скорости вращения очень мал. Разомкнутые схемы асинхронного ЭП с регулятором напряжения обмотки статора используются лишь для воздействия в переходных процессах на момент АД, что может потребоваться, например, для обеспечения заданного ускорения движения ЭП или регулирования натяжения на исполнительном органе рабочей машины. Еще одним недостатком регулирования скорости вращения АД путем изменения скольжения является увеличение электрических потерь мощности в обмотке ротора ΔP_2 при увеличении скольжения, т.е. при уменьшении скорости вращения и расширении диапазона регулирования скорости вращения (см. формулу (7)).

Регулирование напряжения на статоре не приводит к изменению скорости холостого хода $\Omega_0 = 2\pi f_1 / p_{\text{п}}$.

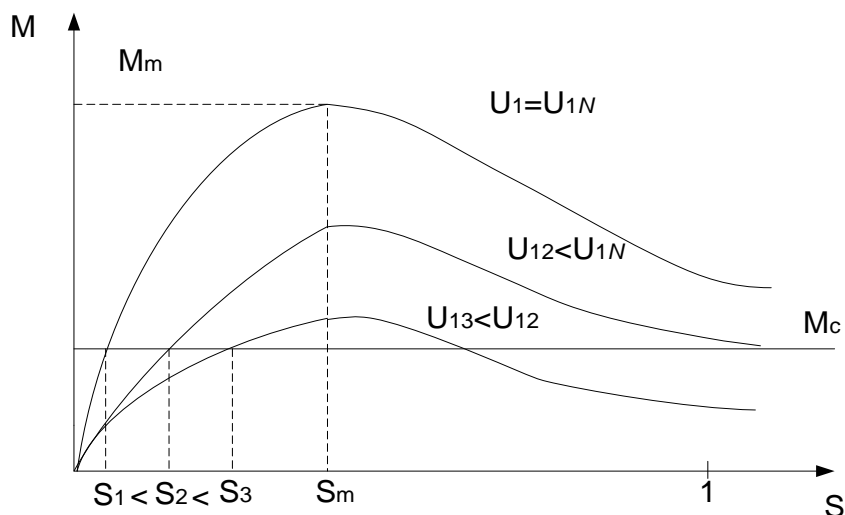


Рис. 3 Механические характеристики асинхронного двигателя при различных значениях напряжения обмотки статора

Задание. Для заданного варианта задачи, приведенном в таблице 1, и заданных значений напряжения обмотки статора U_1 рассчитать и построить естественную и 3 искусственные механические характеристики асинхронного двигателя.

Параметры асинхронных двигателей приведены в Приложении.

Таблица 1 Варианты задач практического занятия и исходные данные

№ вар	1	2	3	4	5	6
Тип ЭД	4А71В 6У3	4А80В 5У3	4А90LD 8У3	4А112МА 8У3	4А132S 8У3	4А160S 8У3
$U_{1,1}$ о.е.	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9
$U_{1,2}$ о.е.	0,6	0,5	0,7	0,6	0,5	0,7
$U_{1,3}$ о.е.	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5

Продолжение таблицы 1

№ вар	7	8	9	10	11	12
Тип ЭД	4А186М 8У3	4А225М 8У3	4А25М 8У3	4А315S 8У3	4А355М 8У3	4А250S 10У3
$U_{1,1}$ о.е.	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9
$U_{1,2}$ о.е.	0,6	0,5	0,7	0,6	0,5	0,7
$U_{1,3}$ о.е.	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5

Продолжение таблицы 1

№ вар	13	14	15	16	17	18
Тип ЭД	4А280М 10У3	4А355М 10У3	4А315S 12У3	4А315М 12У3	4А355S 12У3	4А355М 12У3
$U_{1,1}$ о.е.	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9
$U_{1,2}$ о.е.	0,6	0,5	0,7	0,6	0,5	0,7
$U_{1,3}$ о.е.	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5

В расчетах принять: при частоте питающей сети 50Гц линейное напряжение статора $U_{\Delta} = 380$ В, фазное напряжение ротора $U_{\phi} = 220$ В.

Основные расчетные соотношения:

Механическую характеристику АД следует рассчитать по формуле Клосса

$$M = 2M_k / (s/s_k + s_k/s);$$

Значение критического момента (максимального момента) механической характеристики можно определить с учетом относительного значения критического момента m_k , приведенного в паспортных данных асинхронного двигателя:

$$M_k = m_k M_N.$$

Значение номинального момента определим по паспортным данным двигателя

$$M_N = P_N / \Omega_N.$$

Критическое значение скольжения s_k

$$s_k = s_N \left(m_k + \sqrt{m_k^2 - 1} \right).$$

Расчет естественной механической характеристики АД

Расчет естественной механической характеристики АД проводится по формуле Клосса и формуле для расчета критическое значение скольжения s_k .

Задаваясь значениями скольжения $0 < s < (+s_k)$, рассчитать значение момента АД в двигательном режиме. Результаты расчета свести в таблицу 2, строка « U_{1N} , В», двигательный режим.

Задаваясь значениями скольжения $(-s_k) < s < 0$, рассчитать значение момента АД в генераторном режиме. Результаты расчета свести в таблицу 2 – строка « U_{1N} , В», генераторный режим.

Таблица 2

Результаты теоретического расчета естественной и искусственных механических характеристик АД КЗ при $f_1=f_{1N}=50$ Гц

$U_1, В$		Двигательный режим				Генераторный режим			
$U_{1N}, В$	s								
	$M, Нм$								
$U_{1,1}, В$	s								
	$M, Нм$								
$U_{1,2}, В$	s								
	$M, Нм$								
$U_{1,3}, В$	s								
	$M, Нм$								

Расчет искусственной механической характеристики асинхронного двигателя при пониженном напряжении обмотки статора

Расчет искусственной механической характеристики АД КЗ при пониженном напряжении обмотки статора проводим по формуле Клосса. Величина критического скольжения не зависит от величины напряжения обмотки статора. Значение критического момента в соответствии (13) прямо пропорционально квадрату напряжения обмотки статора, поэтому при расчете искусственной механической характеристики следует рассчитать значение критического момента при пониженном напряжении по формуле:

$$M_{к.и} = M_{к.е} (U_{1и} / U_{1е})^2,$$

где $U_{1и}$ – напряжение фазы, принятое для расчета искусственной механической характеристики АД;

U_{1e} – напряжение фазы, принятое для расчета естественной механической характеристики АД;

$M_{к.е}$ – критическое значение момента АД естественной механической характеристики АД.

Относительное значение критического момента искусственной механической характеристики при пониженном напряжении $M_{к.и}$:

$$m_{к.и} = M_{к.и} / M_N.$$

Расчет искусственных механических характеристик АД провести для трех заданных значений напряжения, подаваемого на обмотку статора: $U_{1,1}$; $U_{1,2}$; $U_{1,3}$.

Для заданных значений напряжения обмотки статора:

- задаваясь значениями скольжения $0 < s < (+s_k)$, рассчитать значение момента АД в двигательном режиме. Результаты расчета свести в таблицу 2;

- задаваясь значениями скольжения $(-s_k) < s < 0$, рассчитать значение момента АД в генераторном режиме. Результаты расчета свести в таблицу 2.

По результатам расчетов, сведенных в таблицу 2 (строки $U_{1,1}$, о.е., $U_{1,2}$, о.е. и $U_{1,3}$, о.е.), построить на графике естественную и искусственные механические характеристики двигательного и генераторного режимов работы АД.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Справочные данные по электрическим двигателям переменного тока

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором

Тип ЭД	P_N , кВт	При номинальной нагрузке			M_K / M_N	$M_{пуск} / M_N$	$I_{пуск} / I_N$	J , кг·м ²
		n_N , об/мин	η_N , %	$\cos\varphi_N$				
Синхронная скорость вращения 750 об/мин								
4A71B6Y3	0,25	680	56	0,65	1,7	1,6	3,0	18,5·10 ⁻⁴
4A80BSY3	0,55	700	64	0,65	1,7	1,6	3,5	33,8·10 ⁻⁴
4A90LD8Y3	1,1	700	70	0,68	1,9	1,6	3,5	86,3·10 ⁻⁴
4A112MA8Y3	2,2	700	76,5	0,71	2,2	1,9	5,0	1,75·10 ⁻²
4A132S8Y3	4,0	720	83,0	0,70	2,6	1,9	5,5	4,25·10 ⁻²
4A160S8Y3	7,5	730	86,0	0,75	2,2	1,4	6,0	13,8·10 ⁻²
4A186M8Y3	15,0	730	87,0	0,82	2,2	1,2	6,0	25·10 ⁻²
4A225M8Y3	30,0	735	90,0	0,81	2,1	1,3	6,0	73,8·10 ⁻²
4A25M8Y3	45,0	740	91,0	0,81	2,0	1,2	6,0	1,36
4A315S8Y3	90,0	740	93,0	0,85	2,3	1,2	6,3	4,93
4A355M8Y3	160,0	740	93,5	0,85	2,2	1,2	6,5	10,2
Синхронная скорость вращения 600 об/мин								
4A250S10Y3	30,0	500	88,0	0,81	1,0	1,2	6,0	1,36
4A280M10Y3	45,0	500	91,5	0,78	1,8	1,0	6,0	3,78
4A355M10Y3	110	500	93,0	0,83	1,8	1,0	6,0	10,0
Синхронная скорость вращения 500 об/мин								
4A315S12Y3	45,0	490	90,5	0,75	1,8	1,0	6,0	5,25
4A315M12Y3	55,0	490	91,0	0,75	1,8	1,0	6,0	6,18
4A355S12Y3	75,0	490	91,5	0,76	1,8	1,0	6,0	9,33
4A355M12Y3	90,0	92,0	0,76	0,76	1,8	1,0	6,0	10,0
	P_N , кВт	n_N , об/мин	$I_{\phi N}$, А	$\cos\varphi_N$	m_K	$M_{пуск} / M_N$	$I_{пуск} / I_N$	J , кг·м ²
МТК011-6	1,4	870	4,8	0,69	2,8	2,8	3,0	0,02
МТК012-6	2,2	875	7,2	0,7	2,8	2,8	3,1	0,0275
МТК111-6	3,5	870	10,1	0,74	2,8	2,8	3,5	0,0462
МТК112-6	5,0	890	13,5	0,75	3,0	3,0	3,9	0,065
МТК211-6	7,5	905	18,4	0,79	2,9	2,8	4,3	0,11
МТКВ311-6	11,0	910	26,0	0,8	3,1	2,8	4,9	0,212
МТКВ311-8	7,5	680	20	0,74	3,1	2,9	4,4	0,262
МТКВ312-6	16	905	37,8	0,79	3,1	2,8	4,9	0,3
МТКВ312-8	11	690	30,4	0,71	3,3	3,1	4,9	0,0375
МТКВ411-6	7,5	935	50	0,78	3,0	2,8	5,2	0,475
МТКВ411-8	16	695	41	0,73	3,3	3,0	4,8	0,512

МТКВ412-6	11	945	62	0,81	3,3	2,8	5,6	0,637
-----------	----	-----	----	------	-----	-----	-----	-------

Технические данные асинхронных двигателей с фазным ротором

Тип	P_N , кВт	n_N , об/мин	η_N , %	$I_{\phi.1 N}$, А	$I_{\phi.2 N}$, А	M_k , Нм	m_k	J_p , кгм ²	$\cos\varphi_N$
МТН011-6	1,4	870	65	4,9	8,8	41,83	2,60	0,021	0,76
МТН012-6	2,2	892	70	6,9	11	66,6	2,70	0,026	0,79
МТН111-6	3,5	905	75,5	8,9	14,2	106,3	2,75	0,042	0,79
МТН112-6	5,0	910	80	12,8	15,5	173	3,14	0,056	0,77
МТН211-6	7,5	922	82	19,0	19,2	252	3,09	0,082	0,80
МТН311-6	11	948	83	25,4	41	324,9	2,80	0,304	0,81
МТН312-6	15	964	84	34,7	46	482,3	3,10	0,374	0,79
МТН311-8	7,5	703	78,5	21	21	298,7	2,80	0,302	0,75
МТН312-8	11	720	81,3	29,6	43	458,3	3,00	0,380	0,77
МТН411-6	24	960	86	51	59	641,6	2,80	0,520	0,87
МТН412-6	30	970	87	66	72	866	2,80	0,630	0,84
МТН411-8	15	717	83	40	48	669,4	3,20	0,520	0,81
МТН412-8	22	725	83	58	58	910,3	3,00	0,630	0,77
МТФ011-6	1,2	800	55	7,1	16,5	39	2,60	0,02	0,78

								1	
MTF012-6	1,7	785	58	10,4	18,5	59	2,72	0,028	0,78
MTF111-6	2,8	860	58	10,4	18,5	88	2,70	0,048	0,78
MTF112-6	4,0	895	72	17,5	21,8	137	3,06	0,067	0,78
MTF211-6	6,0	895	74	27,5	30,0	191	2,85	0,115	0,78
MTF311-6	9,0	925	75	37	56	314	3,22	0,200	0,76
MTF312-6	12	945	81,5	47,2	61	471	3,70	0,312	0,77
MTF411-6	18	945	82	69,5	86	638	3,35	0,500	0,8
MTF412-6	25	960	84	94	100	932	3,58	0,675	0,77
MTF311-8	6	665	71	29	32	265	2,94	0,275	0,78
MTF312-8	8,2	680	75	41	62	422	3,50	0,387	0,73
MTF411-8	13	685	78	56	76	569	3,00	0,537	0,76