

Исследование характеристик асинхронных электродвигателей при несимметричных питающих напряжениях

Цель работы: изучить методы графоаналитических исследований различных характеристик асинхронных электродвигателей при несимметричных питающих напряжениях

1. Основные теоретические положения

1.1. Определение симметричных составляющих напряжений

Вследствие большого числа однофазных электроприемников и сложности равномерного распределения нагрузки по фазам напряжения в сельских электрических сетях 0,4 кВ несимметричны, что отрицательно влияет на работу асинхронных электродвигателей. Их характеристики зависят от напряжений прямой и обратной последовательностей, которые можно найти, если известны линейные напряжения в сети. Центр тяжести треугольника линейных напряжений совпадает с нейтралью звезды фазных напряжений, вектора которых направлены по медианам к его вершинам. Модули несимметричных фазных напряжений определяются по формулам:

$$\begin{cases} U_A = \frac{1}{3} \sqrt{2(U_{AB}^2 + U_{CA}^2) - U_{BC}^2} \\ U_B = \frac{1}{3} \sqrt{2(U_{AB}^2 + U_{BC}^2) - U_{CA}^2} \\ U_C = \frac{1}{3} \sqrt{2(U_{BC}^2 + U_{CA}^2) - U_{AB}^2} \end{cases} \quad (1)$$

Каждое из фазных напряжений определяется суммой векторов составляющих прямой и обратной последовательностей. В каждой из симметричных систем модули напряжений различных фаз равны между собой, а вектора сдвинуты по фазе на 120° , но порядок их чередования противоположен, поэтому модули полных напряжений в системе (1) различаются по величине.

Наиболее простой способ определения напряжений прямой и обратной последовательностей заключается в следующем. Находится определитель обратной последовательности Δ_{2U} , равный:

$$\frac{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}{3} = \frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{9} = U_1^2 + U_2^2 = \Delta_{2U}. \quad (2)$$

В практических расчетах ось координат удобно совмещать с вектором напряжения прямой последовательности в фазе с наибольшим напряжением. Угол между векторами напряжений обратной и прямой последовательностей α_{2U} представляет собой основной аргумент и определяется по формуле:

$$\alpha_{2U} = \mp \arctg \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{2} + \frac{U_{нм}^2 - \Delta_{2U}}{U_{нб}^2 - \Delta_{2U}} \right) \right). \quad (3)$$

Знак минус здесь соответствует чередованию фаз $U_{нб}$; U_{cp} ; $U_{нм}$ в прямом направлении, а знак плюс – в обратном.

Модуль коэффициента обратной последовательности равен:

$$k_{2U} = \frac{\Delta_{2U} \cos \alpha_{2U}}{U_{нб}^2 - \Delta_{2U}} - \sqrt{\left(\frac{\Delta_{2U} \cos \alpha_{2U}}{U_{нб}^2 - \Delta_{2U}} \right)^2 - 1}. \quad (4)$$

Модули напряжений прямой и обратной последовательностей:

$$U_1 = \sqrt{\frac{\Delta_{2U}}{1 + k_{2U}^2}}; \quad U_2 = k_{2U} U_1. \quad (5)$$

Полученные таким образом вектора напряжений прямой и обратной последовательностей показаны на рис. 1.

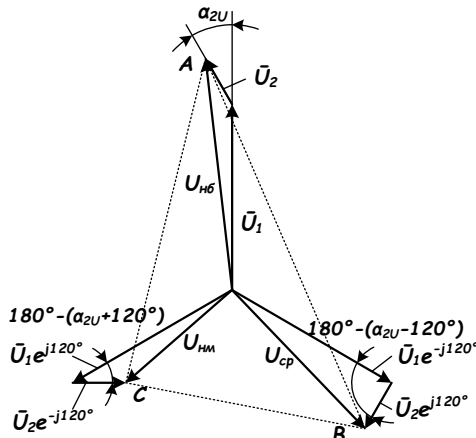


Рисунок 1 - Трехфазная система несимметричных напряжений и ее симметричные составляющие

1.2. Расчет механической характеристики двигателя

Характеристики асинхронных машин при несимметричном питании можно получить методом наложения, считая, что системы напряжений прямой и обратной последовательностей действуют независимо друг от друга. Система напряжений прямой последовательности вызывает в обмотках статора и ротора токи прямой последовательности, создающие основной вращающий момент M_1 , направление которого совпадает с направлением вращения ротора. Под действием напряжений обратной последовательности в обмотках протекают токи обратной последовательности, создающие противоположно направленный момент M_2 . Синхронные частоты вращения прямой и обратной последовательностей равны между собой по величине, и противоположны по знаку: $\omega_{01} = -\omega_{02}$. Скользящие частоты вращения прямой и обратной последовательностей при частоте вращения ротора ω_2 составляют:

$$s_1 = \frac{\omega_{01} - \omega_2}{\omega_{01}}; s_2 = \frac{\omega_{02} - \omega_2}{\omega_{02}} = \frac{\omega_{01} + \omega_2}{\omega_{01}} = 2 - s_1. \quad (6)$$

В обоих случаях для расчетов можно использовать Г-образную схему замещения (рис. 2). Разница заключается в том, что при расчете в нее подставляются напряжения и скольжения прямой (U_1, s_1) или обратной (U_2, s_2) последовательностей.

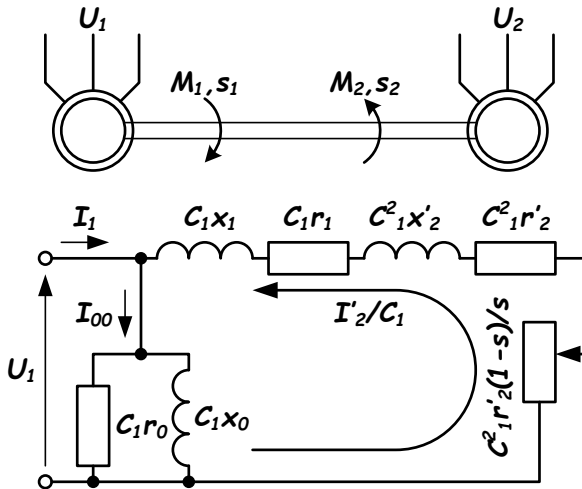


Рисунок 2 - Модель асинхронной машины при несимметричном питании и Г-образная схема замещения

Механические характеристики представляют собой зависимости вращающего момента от частоты вращения ротора: $M = f(n_2)$ или скольжения: $M = f(s)$. Поскольку n_2 и s жёстко связаны, от одной формы записи всегда можно перейти к другой. Частота вращения может выражаться как в оборотах в минуту (n), так и в радианах (ω). Связь между параметрами s , n , ω выражается зависимостями:

$$n_2 = n_0(1 - s); \quad \omega_2 = \omega_0(1 - s);$$

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \cong 0,105n; \quad n = \frac{60}{2\pi} \omega \cong 9,55\omega.$$

Общее уравнение механической характеристики имеет вид:

$$M = \frac{3U^2 \phi r'_2}{s\omega_0 \left[\left(r_1 + C_1 \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2 \right]}, \quad (7)$$

где r_1 ; r'_2 ; x_1 ; x'_2 – активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора соответственно, которые приводятся в каталожных данных (или определяются по опытам холостого хода и короткого замыкания); C_1 – поправочный коэффициент, равный:

$$C_1 = 1 + \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_0} \approx 1 + \frac{\sqrt{r_1^2 + x_1^2}}{z_0}.$$

При параллельном соединении r_0 ; x_0 модуль полного сопротивления определяется по формуле: $z_0 = \frac{r_0 x_0}{\sqrt{r_0^2 + x_0^2}}$.

Важной точкой механической характеристики является точка, соответствующая максимальному (критическому) моменту, равному:

$$M_{max} = \frac{3U^2 \phi}{2C_1 \omega_0 \left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2} \right)}. \quad (8)$$

Скольжение при этом составляет:

$$s_{кр} = \frac{C_1 r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2}}. \quad (9)$$

Пусковой момент определяется по формуле:

$$M_{пуск} = \frac{3U^2 \phi r'_2}{\omega_0 \left((r_1 + C_1 r'_2)^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2 \right)}. \quad (10)$$

Скольжение при пуске равно единице, поскольку $\omega_2 = 0$.

Эти формулы справедливы для напряжений прямой и обратной последовательности. Результирующий момент определяется разностью прямого и обратного моментов, однако, практически всегда (за исключением неполнофазных режимов) можно считать: $M_1 \gg M_2$, и рассчитывать механическую характеристику только по напряжению прямой последовательности, принимая: $U_\phi = U_1$; $M = M_1$.

Механические характеристики можно рассчитать также по приводимым в каталогах относительным значениям максимального (μ_{max}), минимального (μ_{min}), и пускового ($\mu_{пуск}$) моментов. При этом с учетом относительно значения напряжения определяются следующие точки:

• Точка 1 – режим идеального холостого хода, когда частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора, и машина не развивает вращающего момента: $\omega_2 = \omega_0$; $M = 0$

• Точка 2 – режим работы при номинальной частоте вращения:
 $\omega_2 = \omega_{2ном} = \omega_0(1 - s_{ном})$;

$$M = \left(\frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 M_{ном} = \left(\frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 \left(\frac{P_{2ном}}{\omega_{2ном}} \right)$$

• Точка 3 – режим, при котором электродвигатель развивает максимальный вращающий момент:

$$\omega_2 = \omega_0(1 - s_{кр}); \quad M = M_{max} = \left(\frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 \mu_{max} M_{ном}$$

• Точка 4 – соответствует провалу в механической характеристике:

$$\omega_2 \approx 0,2\omega_0; \quad M = M_{min} = \left(\frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 \mu_{min} M_{ном}$$

• Точка 5 – соответствует моменту пуска:

$$\omega_2 = 0; \quad M = M_{пуск} = \left(\frac{U_1}{U_{ном}} \right)^2 \mu_{пуск} M_{ном}$$

При $s > s_{кр}$ значения моментов, рассчитанные по каталожным данным, могут существенно отличаться от тех, которые вычислены при тех же скольжениях по уравнению (7). Это объясняется изменением параметров двигателя в процессе пуска за счет эффекта вытеснения тока, и действием высших гармонических составляющих магнитных потоков в воздушном зазоре. Общий вид механических характеристик показан на рис. 3.

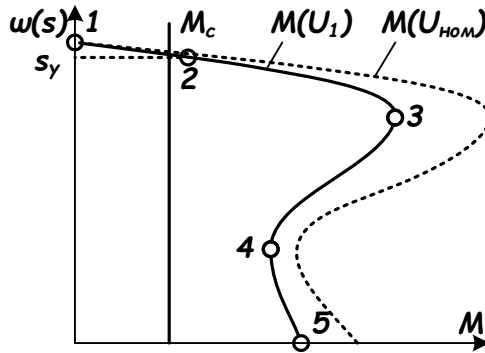


Рисунок 3 - Механические характеристики асинхронного электродвигателя и рабочей машины

Установившийся режим работы характеризуется равенством момента, развиваемого двигателем и момента сопротивления рабочей машины M_c . Для многих механизмов можно считать, что момент сопротивления не зависит от скорости, при этом его можно выразить в долях от номинального момента двигателя (коэффициента загрузки):

$$M_c = k_z M_{ном}; \quad k_z = \frac{M_c}{M_{ном}}.$$

При коэффициентах загрузки $k_z \leq 1,0$ и относительно небольших снижениях напряжения скольжение по прямой последовательности в установившемся режиме работы определяется по формуле:

$$s_{уст1} \approx \frac{k_z}{\left(\frac{U_1}{U_{ном}}\right)^2} s_{ном}. \tag{11}$$

1.3. Определение токов и потерь в обмотке статора

Скольжение s_2 в соответствии с (6) велико, поскольку по отношению к системе обратного чередования фаз машина находится в режиме электромагнитного торможения. Даже при относительно небольших напряжениях обратной последовательности соответствующие токи и дополнительные потери мощности могут быть весьма значительными. Приведенные токи ротора прямой и обратной последовательностей в установившемся режиме вычисляются по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{I}'_{21} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}'_1} = \frac{\bar{U}_1}{\sqrt{\left(r_1 + C_1 \frac{r'_2}{s_1}\right)^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2}} \\ \bar{I}'_{22} = \frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}'_2} = \frac{\bar{U}_2}{\sqrt{\left(r_1 + C_1 \frac{r'_2}{2-s_1}\right)^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2}} \end{array} \right. , \quad (12)$$

из которых следует, что они зависят не только от величин, но и от фазовых сдвигов напряжений и сопротивлений прямой и обратной последовательностей. Фазовые сдвиги токов относительно соответствующих напряжений равны:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{21} = \arctg \frac{x_1 + C_1 x'_2}{r_1 + C_1 \frac{r'_2}{s_1}} \\ \varphi_{22} = \arctg \frac{x_1 + C_1 x'_2}{r_1 + C_1 \frac{r'_2}{2-s_1}} \end{array} \right. . \quad (13)$$

Токи обратной последовательности практически не зависят от нагрузки. Вследствие того, что сопротивление ветви намагничивания многократно превышает сопротивление обратной последовательности: $z_0 \gg z_2$, намагничивающий ток определяется только по напряжению прямой последовательности. Для Г-образной схемы замещения при параллельном соединении r_0 ; x_0 :

$$z_0 = \frac{r_0 x_0}{\sqrt{r_0^2 + x_0^2}}; I_{00} = \frac{U_1}{C_1 z_0}; \varphi_0 = \arctg \frac{r_0}{x_0}. \quad (14)$$

Полные токи в фазах обмотки статора найдем с помощью векторной диаграммы (рис. 4), на которой вектора токов и напряжений прямой последовательности различных фаз совмещены. Строится она следующим образом.

1. Откладываем вектор напряжения прямой последовательности, и под углом α_{2U} к нему достраиваем вектор напряжения обратной последовательности \underline{U}_2

2. Выбираем масштаб токов, и под углом φ_0 по отношению к вектору \underline{U}_1 из начала координат строим вектор тока намагничивания \underline{I}_{00}

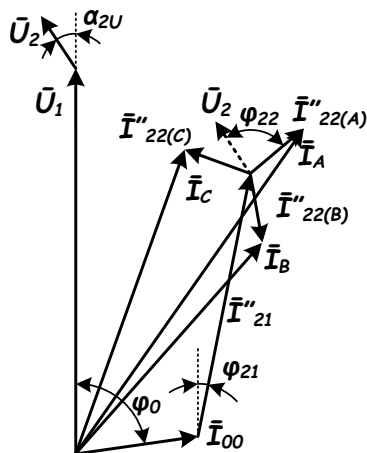


Рисунок 4 - Совмещенная векторная диаграмма токов АД при несимметрии питающих напряжений

3. В том же масштабе из конца вектора I_{00} под углом φ_{21} откладываем вектор тока $\bar{I}''_{21} = -\bar{I}'_{21}/C_1$

4. Под углом φ_{22} по отношению к вектору \underline{U}_2 откладываем от конца вектора \bar{I}''_{21} вектор тока $\bar{I}''_{22} = -\bar{I}'_{22}/C_1$

5. Чтобы получить полные токи в двух других фазах, из той же точки строим вектора тока \bar{I}''_{22} , повернутые на $\pm 120^\circ$.

6. Соединяя начало координат с концами векторов токов обратной последовательности, получаем вектора $\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C$, по которым с учетом масштаба вычисляем токи в различных фазах обмотки статора.

Электрические потери в отдельных фазах обмотки статора и их сумма определяются по формулам:

$$\Delta P_{эл(A)} = I_A^2 r_1; \quad \Delta P_{эл(B)} = I_B^2 r_1; \quad \Delta P_{эл(C)} = I_C^2 r_1, \quad (15)$$

$$\Delta P_{эл\Sigma} = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) r_1 = 3(I_1^2 + I_2^2) r_1. \quad (16)$$

Суммарные потери зависят только от модулей токов прямой и обратной последовательностей, и увеличиваются по сравнению с симметричным режимом относительно мало. Однако, потери в отдельных

фазах неодинаковы. В фазе с наибольшим током они находятся в пределах:

$$\left(I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2\right) r_1 \leq \Delta P_{эл(нб)} \leq \left(I_1^2 + 2I_1 I_2 + I_2^2\right),$$

и могут значительно превышать среднее значение, и потери при номинальном токе: $\Delta P_{эл(нб)} \geq \Delta P_{эл(ном)} = I_{ном}^2 r$. Такой режим может привести к повышенному нагреву одной из обмоток.

2. Порядок выполнения работы

2.1. По заданным линейным напряжениям определить модули напряжений прямой и обратной последовательностей и основной аргумент. Построить треугольник линейных напряжений и векторную диаграмму фазных напряжений с указанием всех составляющих (рис. 1).

2.2. По указанному в задании типу асинхронного электродвигателя писать его каталожные данные, необходимые для дальнейших расчетов. По каталожным значениям кратностей максимального, минимального и пускового моментов рассчитать и построить механическую характеристику при напряжении прямой последовательности, определенном в п. 2.1. По приведенному в задании коэффициенту загрузки определить момент статического сопротивления, построить соответствующую характеристику. Определить скольжение в установившемся режиме работы. По формуле (7) рассчитать значения моментов при скольжениях, равных $s_{ном}$; $s_{уст.1}$ $s_{кр}$. Сравнить их со значениями, полученными при расчете по каталожным данным. Объяснить, чем объясняются расхождения.

2.3. Рассчитать по формулам (12) – (14) модули и аргументы токов прямой и обратной последовательностей в установившемся режиме работы, (при скольжении $s_{уст.1}$), а также намагничивающего тока. Построить в масштабе векторную диаграмму токов (рис.4) и определить их модули в различных фазах. Определить суммарные электрические потери, и потери в отдельных фазах обмотки статора. Наибольшее из полученных значений сравнить с потерями при номинальном токе. Сделать выводы.

Приложение 1. Каталожные данные асинхронных короткозамкнутых электродвигателей серии 4А

Типоразмер	$P, \text{ кВт}$	$\eta, \%$	$\cos\varphi$	$I_{\text{л}}, \text{ А}$	$S_{\text{ном}}$	$S_{\text{кр}}$	$M_{\text{кр}}^*$	$M_{\text{првк}}^*$	$M_{\text{мин}}^*$
Синхронная частота вращения 314 с⁻¹									
4А 71В2У3	1,1	77,5	0,87	2,5	0,063	0,390	2,2	2,0	1,5
4А 80А2У3	1,5	81,0	0,85	3,3	0,042	0,355	2,6	2,1	1,4
4А 80В2У3	2,2	83,0	0,87	4,6	0,043	0,380	2,6	2,1	1,4
4А 90Л2У3	3,0	84,5	0,88	6,1	0,043	0,325	2,5	2,1	1,6
4А 100 S2У3	4,0	86,5	0,89	7,9	0,033	0,280	2,5	2,0	1,6
4А 100 L2У3	5,5	87,5	0,91	10,5	0,034	0,290	2,5	2,0	1,6
4А 112М2У3	7,5	87,5	0,88	14,8	0,025	0,170	2,8	2,0	1,8
4А 132М2У3	11,6	88,0	0,90	21,0	0,023	0,190	2,8	1,7	1,5
4А 160S2У3	15,0	88,0	0,91	28,4	0,021	0,120	2,2	1,4	1,0
4А 160М2У3	18,5	88,5	0,92	34,4	0,021	0,125	2,2	1,4	1,0
4А 180S2У3	30,0	90,5	0,90	55,8	0,018	0,125	2,5	1,4	1,1
4А 200М2У3	37,0	90,0	0,89	70,0	0,019	0,115	2,5	1,4	1,0
4А 200L2У3	45,0	91,0	0,90	83,3	0,018	0,115	2,5	1,4	1,0
Синхронная частота вращения 157 с⁻¹									
4А 80А4У3	1,1	75,0	0,81	2,7	0,054	0,340	2,2	2,0	1,6
4А 80В4У3	1,5	77,0	0,83	3,6	0,058	0,345	2,2	2,0	1,6
4А 90Л4У3	2,2	80,0	0,83	5,0	0,051	0,330	2,4	2,1	1,6
4А 100S4У3	3,0	82,0	0,83	6,7	0,044	0,310	2,4	2,0	1,6
4А 100L4У3	4,0	84,0	0,84	8,6	0,046	0,315	2,4	2,0	1,6
4А 112М4У3	5,5	85,5	0,85	11,5	0,036	0,250	2,2	2,0	1,6
4А 132 S4У3	7,5	87,5	0,86	15,1	0,029	0,195	3,0	2,2	1,7
4А 132М4У3	11,0	87,5	0,87	21,9	0,028	0,195	3,0	2,2	1,7
4А 160S4У3	15,0	88,5	0,88	29,2	0,023	0,160	2,3	1,4	1,0
4А 160М4У3	18,5	89,5	0,88	35,6	0,022	0,160	2,3	1,4	1,0
4А 180S4У3	22,0	90,0	0,90	41,2	0,020	0,140	2,3	1,4	1,0
4А 180М4У3	30,0	91,0	0,89	56,1	0,019	0,140	2,3	1,4	1,0
4А 200М4У3	37,0	91,0	0,90	68,5	0,017	0,10	2,5	1,4	1,0
4А 200L4У3	45,0	92,0	0,90	82,4	0,016	0,10	2,5	1,4	1,0
Синхронная частота вращения 104,7 с⁻¹									
4А 100L6У3	2,2	81,0	0,73	5,6	0,051	0,250	2,2	2,0	1,6
4А 112МА6У3	3,0	81,0	0,76	7,4	0,047	0,370	2,5	2,0	1,8
4А 112МВ6У3	4,0	82,0	0,81	9,1	0,051	0,380	2,5	2,0	1,8
4А 132S6У3	5,5	85,0	0,80	12,3	0,033	0,360	2,5	2,0	1,8
4А 132М6У3	7,5	85,5	0,81	16,4	0,032	0,260	2,5	2,0	1,8
4А 160S6У3	11,0	86,0	0,86	22,5	0,027	0,150	2,0	1,2	1,0
4А 160М6У3	15,0	87,5	0,87	29,9	0,026	0,140	2,0	1,2	1,0
4А 180М6У3	18,5	88,0	0,87	36,6	0,024	0,135	2,0	1,2	1,0
4А 200М6У3	22,0	90,0	0,90	41,2	0,023	0,135	2,4	1,3	1,0
4А 200L6У3	30,0	90,5	0,90	55,8	0,021	0,135	2,4	1,3	1,0

Приложение 1. Каталожные данные асинхронных электродвигателей серии 4А (продолжение). Сопротивления ветви намагничивания соответствуют параллельному соединению

Типоразмер	r_0, OM	x_0, OM	r_1, OM	x_1, OM	r'_2, OM	x'_2, OM
Синхронная частота вращения 314 c^{-1}						
4А 71В2У3	2263	249	11,6	4,81	6,41	7,48
4А 80А2У3	1745	167	5,60	3,40	3,27	5,40
4А 80В2У3	1362	129	3,62	2,38	2,34	4,15
4А 90Л2У3	1142	122	2,59	2,05	1,69	3,60
4А 100 S2У3	911,9	95	1,51	1,54	1,01	2,77
4А 100 L2У3	721,4	79,9	1,05	1,14	0,757	2,31
4А 112М2У3	494,3	55,2	0,686	0,865	0,417	2,09
4А 132М2У3	348,9	43,9	0,418	0,713	0,261	1,25
4А 160S2У3	272,9	31,0	0,403	0,638	0,171	0,930
4А 160М2У3	234,5	28,8	0,313	0,588	0,141	0,767
4А 180S2У3	175,9	19,1	0,207	0,483	0,106	0,585
4А 180М2У3	142,5	15,0	0,118	0,288	0,071	0,434
4А 200М2У3	111,5	12,9	0,91	0,295	0,066	0,377
4А 200L2У3	102,9	12,9	0,071	0,233	0,053	0,344
Синхронная частота вращения 157 c^{-1}						
4А 80А4У3	1654	136	9,62	6,25	5,45	9,62
4А 80В4У3	1437	118	7,42	4,82	4,26	7,42
4А 90Л4У3	1132	92	4,29	3,33	2,63	5,70
4А 100S4У3	890,1	72,5	2,57	2,60	1,75	4,28
4А 100L4У3	755,7	61,5	1,72	2,02	1,36	3,59
4А 112М4У3	604,0	53,7	1,23	1,50	0,787	2,49
4А 132 S4У3	484,0	43,7	0,699	1,24	0,481	1,89
4А 132М4У3	328,3	32,1	0,432	0,854	0,321	1,31
4А 160S4У3	268,9	30,2	0,354	0,648	0,188	0,98
4А 160М4У3	231,6	26,6	0,26-	0,525	0,148	0,803
4А 180S4У3	201,9	21,4	0,219	0,428	0,112	0,641
4А 180М4У3	150,8	15,3	0,133	0,267	0,071	0,470
4А 200М4У3	130,4	14,1	0,125	0,276	0,058	0,450
4А 200L4У3	114,6	12,3	0,091	0,219	0,045	0,374
Синхронная частота вращения $104,7 \text{ c}^{-1}$						
4А 100L6У3	1455	74,1	3,51	4,29	2,61	8,20
4А 112МА6У3	1044	56,6	2,53	2,20	1,88	2,98
4А 112МВ6У3	538,3	48,2	1,86	1,76	1,49	2,65
4А 132S6У3	424,0	34,1	1,20	1,29	0,736	1,97
4А 132М6У3	341,9	28,2	0,804	0,939	0,536	1,47
4А 160S6У3	292,2	29,3	0,713	1,070	0,293	1,46
4А 160М6У3	273,4	22,1	0,457	0,737	0,206	1,18
4А 180М6У3	307,9	17,4	0,337	0,661	0,156	0,781
4А 200М6У3	284,3	21,9	0,267	0,588	0,128	0,748
4А 200L6У3	233,92	14,6	0,181	0,473	0,087	0,512