

Л.В. Дубинец, д-р техн. наук, О.Л. Маренич, О.А. Карзова, Р.В. Краснов, канд-ты техн. наук, А.А. Мельник

(Украина, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)

УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО РЕМОНТУ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Введение

Технологический процесс ремонта подвижного состава в локомотивных, вагонных депо, на заводах по ремонту подвижного состава характеризуется существенной неравномерностью нагрузки соответствующего оборудования. Например, электроприводы станков токарной группы, конвейеров, которые в основном нерегулируемые, могут быть нагружены от номинальной мощности P_H до $(0,2...0,3)P_H$ [1].

При этом нагрузка в пределах $(0,2...0,3)P_H$ составляет существенную часть времени. В то же время номинальная мощность двигателя должна быть такой, чтобы можно было обеспечить нормальную работу механизмов при их максимальной нагрузке, хотя это время составляет меньшую часть по сравнению с общим циклом технологического процесса. Поэтому для указанных предприятий целесообразно предусмотреть меры, способствующие тому, чтобы при недогрузке электроприводов их энергетические показатели (коэффициент полезного действия, коэффициент мощности) не ухудшались по сравнению с номинальным режимом. В большинстве случаев в качестве двигателя указанных приводов используются асинхронные двигатели (АД).

Известны следующие способы улучшения энергетических показателей электропривода при его недогрузке:

- ограничение режима холостого хода;
- использование при малых нагрузках двигателей с меньшей номинальной мощностью. При этом

АД будет работать в области больших нагрузок с высоким коэффициентом мощности ($\cos j$). Кроме того, коэффициент полезного действия более нагруженного АД будет более высоким;

- снижение напряжения, подаваемого на АД, который работает с меньшей нагрузкой. При этом уменьшаются потребляемый из сети ток и реактивная мощность, повышается $\cos j$. Реализуется это с помощью регулятора напряжения, переключением обмотки статора со схемы треугольника на звезду, что понижает напряжение на обмотке каждой фазы в $\sqrt{3}$ раз;

- использование компенсирующих устройств в виде конденсаторов.

С точки зрения минимума первоначальных затрат выделяем два способа:

- ограничение во времени режима холостого хода;
- снижение напряжения путем переключения обмотки статора АД со схемы треугольника на звезду.

Эффективность ограничения режима холостого хода очевидна и не требует каких-либо исследований. Методы улучшения энергетических показателей электропривода также известны (установка специальных ограничителей и т. д.).

Переключение обмотки статора АД со схемы треугольника на звезду наиболее простой по исполнению и капитальным затратам способ улучшения энергетических показателей нерегулируемых электроприводов на предприятиях по ремонту подвижного состава. Но в питающих сетях цехов этих предприятий в настоящее время напряжение 380 В, а промышленность пока выпускает двигатели на 380 В только по схеме "звезда". Вместе с тем имеется информация, что ряд заводов-изготовителей асинхронных двигателей готовы выпускать двигатели с такими техническими характеристиками, какие определит заказчик. В нашем случае это должны быть двигатели, которые будут предназначены для работы от сети 380 В при соединении обмоток статора как по схеме "треугольник" (Δ), так и по схеме "звезда" (Y).

В связи с этим следует провести исследования по определению эффективности этого способа с целью улучшения энергетических показателей вышеуказанных приводов.

Основной материал

В качестве базового для исследования принимаем двигатель современной серии АИР типа 100L4 с номинальной мощностью $P_H = 4$ кВт, так как двигатели с мощностью, близкой к этой, в большинстве случаев используются в приводах токарных станков и конвейеров на предприятиях по ремонту подвижного состава.

Для двигателя АИР 100L4: $P_H = 4$ кВт, $n_H = 1420$ об/мин, $h_H = 82,8$ %, $\cos j = 0,81$, $I_H = 9,3$ А, $U_c = 380$ В (напряжение питающей сети), $M_{\max}/M_H = 2,3$, $Q = 37$ кг, схема соединения – Y [2].

Полная мощность АД не зависит от схемы соединения обмоток статора. Поэтому

$$3 \cdot U_{\text{фн}\Delta} \cdot I_{\text{фн}\Delta} = 3 \cdot U_{\text{фнY}} \cdot I_{\text{фнY}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{фн}\Delta}$, $U_{\text{фнY}}$, $I_{\text{фн}\Delta}$, $I_{\text{фнY}}$ – соответственно фазные номинальные напряжения и токи статора при схемах соединения Δ и Y.

Откуда

$$I_{\text{фн}\Delta} = \frac{U_{\text{фнY}} \cdot I_{\text{фнY}}}{U_{\text{фн}\Delta}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{фн}\Delta} = U_c = 380$ В; $U_{\text{фнY}} = \frac{U_c}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220$ В; $I_H = I_{\text{фнY}} = 9,3$ А или $I_{\text{фн}\Delta} = \frac{220 \cdot 9,3}{380} = 5,38$ А.

Определим энергетические параметры АД при соединении обмотки статора в Δ и при коэффициенте нагрузки $m_c = 0,5$ согласно следующей методике [3]:

1. Номинальное значение фазного намагничивающего тока холостого хода

$$I_{\text{ф0}\Delta} = I_{\text{фн}\Delta} \cdot \left(\sin j_H - \frac{\cos j_H}{b_H + \sqrt{b_H^2 - 1}} \right), \quad (3)$$

где $b_H = \frac{M_{\max}}{M_H} = 2,3$ – кратность максимального момента;

$$\sin j_H = \sqrt{1 - \cos^2 j_H} = \sqrt{1 - 0,81^2} = 0,586$$

или

$$I_{\text{ф0}\Delta} = 5,38 \cdot \left(0,586 - \frac{0,81}{2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1}} \right) = 2,157 \text{ А.}$$

2. Кратность фазного тока статора при холостом ходе $I_{\text{ф0}\Delta}$

$$\frac{I_{\text{ф0}\Delta}}{I_{\text{фн}\Delta}} = \frac{2,157}{5,38} = 0,4. \quad (4)$$

3. Кратность приведенного номинального тока ротора

$$\frac{I'_{2H}}{I_{\text{фн}\Delta}} = 0,81. \quad (5)$$

4. Относительное значение приведенного тока ротора

$$\frac{I'_2}{I'_{2H\Delta}} = \sqrt{m_c \cdot \frac{b_H + \sqrt{b_H^2 - 1}}{b_{c\Delta} + \sqrt{b_{c\Delta}^2 - 1}}}, \quad (6)$$

где $m_c = \frac{P_{\text{ср}}}{P_H}$ – коэффициент нагрузки; $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность на валу электродвигателя за определен-

ное время; $b_c = \frac{b_H \cdot k_U^2}{m_c}$; $b_c = \frac{2,3}{0,5} = 4,6$; $k_U = 1$ – коэффициент изменения напряжения

или

$$\frac{I'_2}{I'_{2H\Delta}} = \sqrt{0,5 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1}}{4,6 + \sqrt{4,6^2 - 1}}} = 0,49.$$

5.

$$\begin{aligned}\cos j'_{\Delta} &= \sqrt{\frac{b_{c\Delta} + \sqrt{b_{c\Delta}^2 - 1}}{2b_{c\Delta}}}, \\ \cos j'_{\Delta} &= \sqrt{\frac{4,6 + \sqrt{4,6^2 - 1}}{2 \cdot 4,6}} = 0,994. \\ \sin j'_{\Delta} &= \sqrt{1 - (\cos j'_{\Delta})^2}, \\ \sin j'_{\Delta} &= \sqrt{1 - 0,994^2} = 0,109.\end{aligned}\tag{7}$$

6. Реактивная мощность при номинальном фазном напряжении (380 В для схемы соединения Δ) и коэффициенте нагрузки $m_c = 0,5$

$$Q_{\Delta} = 3 \cdot U_{\text{фн}\Delta} \cdot I_{\text{фн}\Delta} \left(\frac{I'_{2\text{н}}}{I_{\text{фн}\Delta}} \cdot \frac{I'_2}{I'_{2\text{н}\Delta}} \cdot \sin j'_{\Delta} + \frac{I_{\text{ф0}\Delta}}{I_{\text{фн}\Delta}} \right)\tag{8}$$

или

$$Q_{\Delta} = 3 \cdot 380 \cdot 5,38(0,81 \cdot 0,49 \cdot 0,109 + 0,4) = 2,72 \text{ кВАр}.$$

7. Фазный ток статора при $m_c = 0,5$

$$I_{1\text{ф}\Delta} = I_{\text{фн}\Delta} \sqrt{\left(\frac{I'_{2\text{н}}}{I_{\text{фн}\Delta}} \cdot \frac{I'_2}{I'_{2\text{н}\Delta}} \cdot \sin j'_{\Delta} + \frac{I_{\text{ф0}\Delta}}{I_{\text{фн}\Delta}} \right)^2 + \left(\frac{I'_{2\text{н}}}{I_{\text{фн}\Delta}} \right)^2 \cdot \left(\frac{I'_2}{I'_{2\text{н}\Delta}} \right)^2 \cdot \cos j'_{\Delta}^2}\tag{9}$$

или

$$I_{1\text{ф}\Delta} = 5,38 \sqrt{(0,81 \cdot 0,49 \cdot 0,109 + 0,4)^2 + 0,81^2 \cdot 0,49^2 \cdot 0,994^2} = 3,19 \text{ А}.$$

8. Скольжение

$$s_{\text{н}} = \frac{n_{\text{с}} - n_{\text{н}}}{n_{\text{с}}} \cdot 100\%\tag{10}$$

или

$$s_{\text{н}} = \frac{1500 - 1420}{1500} \cdot 100 = 5,33 \text{ \%}.$$

9. Суммарные потери при $m_c = 0,5$

$$\sum \Delta P_{1\Delta} = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{стали ст.}\Delta} + \Delta P_{\text{об.доб}} \cdot \left(\frac{I_{1\text{ф}\Delta}}{I_{\text{фн}\Delta}} \right)^2 + \Delta P_{\text{рот}} \cdot \left(\frac{I'_2}{I'_{2\text{н}\Delta}} \right)^2.\tag{11}$$

Механические потери

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{мех}} &= 0,01 \cdot P_{\text{н}} \\ \Delta P_{\text{мех}} &= 0,01 \cdot 4000 = 40 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

Электрические потери в сумме с добавочными

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{об.доб}} &= 3 \cdot I_{\text{фн}\Delta}^2 \cdot r_1 + 0,005 P_{\text{н}}, \\ r_1 &= r'_{20},\end{aligned}$$

$$r'_{20} = \frac{U_{\text{фн}\Delta}^2 (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot (P_H + \Delta P_{\text{мех}}) \cdot b_H \cdot \left(1 + \frac{C_1}{S_H \cdot (b_H + \sqrt{b_H^2 - 1})} \right)} \quad (12)$$

или

$$r'_{20} = \frac{380^2 (1 - 0,0533)}{2 \cdot 1,03 \cdot (4000 + 40) \cdot 2,3 \cdot \left(1 + \frac{1,03}{0,0533 \cdot (2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1})} \right)} = 1,32 \text{ Ом.}$$

$$C_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_0}.$$

Из опыта расчетов параметров АД средней мощности $C_1 \approx 1,03$. Тогда

$$\Delta P_{\text{об.доб}} = 3 \cdot 5,38^2 \cdot 1,32 + 0,005 \cdot 4000 = 134,6 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери в номинальном режиме

$$\sum \Delta P_H = \frac{P_H (1 - h_H)}{h_H} \quad (13)$$

или

$$\sum \Delta P_H = \frac{4000 (1 - 0,828)}{0,828} = 830,92 \text{ Вт.}$$

Потери в роторе

$$\Delta P_{\text{рот}} = \frac{1,01 \cdot P_H \cdot s_H}{1 - s_H} \quad (14)$$

или

$$\Delta P_{\text{рот}} = \frac{1,01 \cdot 4000 \cdot 0,0533}{1 - 0,0533} = 227,38 \text{ Вт.}$$

Потери в стали статора

$$\Delta P_{\text{стали ст.}\Delta} = \sum \Delta P_H - (\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{об.доб}} + \Delta P_{\text{рот}}) \quad (15)$$

или

$$\Delta P_{\text{стали ст.}\Delta} = 830,9 - (40 + 134,6 + 227,38) = 428,94 \text{ Вт.}$$

Потери в стали не зависят от нагрузки. Поэтому при всех значениях m_c принимаем $\Delta P_{\text{стали ст.}\Delta} = 0,429 \text{ кВт.}$ Тогда в соответствии с приведенной выше формулой (11)

$$\sum \Delta P_{1\Delta} = 40 + 429 + 134,6 \cdot \left(\frac{3,19}{5,38} \right)^2 + 227,38 \cdot 0,49^2 = 570,91 \text{ Вт} \approx 0,57 \text{ кВт.}$$

10. Коэффициент мощности

$$\cos j_{m_c\Delta} = \frac{m_c \cdot P_H + \sum \Delta P_{1\Delta}}{\sqrt{Q_{\Delta}^2 + (m_c \cdot P_H + \sum \Delta P_{1\Delta})^2}} \quad (16)$$

или

$$\cos j_{m_c\Delta} = \frac{0,5 \cdot 4 + 0,57}{\sqrt{2,72^2 + (0,5 \cdot 4 + 0,57)^2}} = 0,687.$$

11. Коэффициент полезного действия

$$h_{m\Delta} = \frac{P_n}{P_n + \sum \Delta P_{1\Delta}} \quad (17)$$

$$\text{или } h_{m\Delta} = \frac{4}{4 + 0,57} = 0,875.$$

Далее согласно методике, рассмотренной для схемы соединения обмотки статора в Δ , определяем параметры при соединении обмоток статора в Y ($U_{\text{фн}Y} = 220$ В), и $m_c = 0,5$.

$$1. I_{\text{ф}0Y} = \frac{I_{\text{ф}0\Delta}}{2}.$$

При напряжении, меньшем в $\sqrt{3}$ раз, ток намагничивания снижается примерно в 2 раза, т. е.

$$I_{\text{ф}0Y} = \frac{2,157}{2} = 1,08 \text{ А.}$$

$$2. \frac{I_{\text{ф}0Y}}{I_{\text{фн}Y}} = \frac{1,08}{9,3} = 0,116.$$

$$3. \frac{I'_{2n}}{I_{\text{фн}Y}} = 0,94.$$

$$4. \frac{I'_2}{I'_{2nY}} = \sqrt{0,5 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1}}{1,53 + \sqrt{1,53^2 - 1}}} = 0,9.$$

$$\text{Здесь } b_{cY} = \frac{b_n \cdot k_U^2}{m_c} = \frac{2,3}{0,5} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 = 1,53, \quad k_U = \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

$$5. \cos j'_Y = \frac{1,53 + \sqrt{1,53^2 - 1}}{2 \cdot 1,53} = 0,94; \quad \sin j'_Y = \sqrt{1 - 0,94^2} = 0,341.$$

$$6. Q_Y = 3 \cdot U_{\text{фн}Y} \cdot I_{\text{фн}Y} \left(\frac{I'_{2n}}{I_{\text{фн}Y}} \cdot \frac{I'_2}{I'_{2nY}} \cdot \sin j'_Y + \frac{I_{\text{ф}0Y}}{I_{\text{фн}Y}} \right), \quad I_{\text{фн}Y} = I_n = 9,3 \text{ А,}$$

$$\text{или } Q_Y = 3 \cdot 220 \cdot 9,3 (0,94 \cdot 0,9 \cdot 0,341 + 0,116) = 2,45 \times 10^3 \text{ вар.}$$

$$7. I_{1\text{ф}Y} = I_{\text{фн}Y} \sqrt{\left(\frac{I'_{2n}}{I_{\text{фн}Y}} \cdot \frac{I'_2}{I'_{2nY}} \cdot \sin j'_Y + \frac{I_{\text{ф}0Y}}{I_{\text{фн}Y}} \right)^2 + \left(\frac{I'_{2n}}{I_{\text{фн}Y}} \right)^2 \cdot \left(\frac{I'_2}{I'_{2nY}} \right)^2 \cdot \cos j'^2_Y}$$

$$\text{или } I_{1\text{ф}Y} = 9,3 \sqrt{(0,94 \cdot 0,9 \cdot 0,341 + 0,116)^2 + 0,94^2 \cdot 0,9^2 \cdot 0,94^2} = 8,29 \text{ А.}$$

8. $s_n = 5,33$ %. Скольжение при схемах соединения обмотки статора в Δ и Y примерно одинаково.

9. $\sum \Delta P_n = 830,92$ Вт (как и при соединении в Δ).

Потери в стали при соединении звездой в три раза меньше, чем при соединении треугольником, так как эти потери пропорциональны квадрату индукции (напряжения) $U_{\text{фн}\Delta}^2 / U_{\text{фн}Y}^2 = 380^2 / 220^2 = 3$.

Таким образом,

$$\Delta P_{\text{стали ст.}Y} = \frac{\Delta P_{\text{стали ст.}\Delta}}{3} = \frac{429}{3} = 143 \text{ Вт;}$$

$\Delta P_{\text{рот}} = 227,38$ Вт (как и при соединении в Δ);

$$\sum \Delta P_{1Y} = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{стали ст.}Y} + \Delta P_{\text{об.доб}} \cdot \frac{I_{1\text{ф}Y}^2}{I_{\text{фн}Y}^2} + \Delta P_{\text{рот}} \cdot \left(\frac{I'_2}{I'_{2nY}} \right)^2;$$

$\Delta P_{\text{мех}} = 40$ Вт (как и при соединении в Δ);

$$\Delta P_{\text{об.доб}} = 3 \cdot I_{\text{фнY}}^2 \cdot r_1 + 0,005 P_{\text{н}}$$

$$\text{или } \Delta P_{\text{об.доб}} = 3 \cdot 9,3^2 \cdot 1,32 + 0,005 \cdot 4000 = 362,5 \text{ Вт};$$

$$\sum \Delta P_{1Y} = 40 + 143 + 362,5 \cdot \frac{8,29^2}{9,3^2} + 227,38 \cdot 0,9^2 = 655,2 \text{ Вт} \approx 0,65 \text{ кВт.}$$

$$10. \cos j_{m_c Y} = \frac{m_c \cdot P_{\text{н}} + \sum \Delta P_{1Y}}{\sqrt{Q_Y^2 + (m_c \cdot P_{\text{н}} + \sum \Delta P_{1Y})^2}} \text{ или } \cos j_{m_c Y} = \frac{0,5 \cdot 4 + 0,65}{\sqrt{2,45^2 + (0,5 \cdot 4 + 0,65)^2}} = 0,734.$$

$$11. h_{m_c Y} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н}} + \sum \Delta P_{1Y}} \text{ или } h_{m_c Y} = \frac{4}{4 + 0,65} = 0,86.$$

Следовательно, в потреблении реактивной мощности выигрываем на $Q_{\Delta} - Q_Y = 2,72 - 2,45 = 0,27$ квар, а повышение коэффициента мощности с $\cos j_{m_c \Delta} = 0,687$ до $\cos j_{m_c Y} = 0,734$ вызывает увеличение активных потерь на $\sum \Delta P_{1Y} - \sum \Delta P_{1\Delta} = 0,65 - 0,57 = 0,08$ кВт. На 1 квар затрачивается активной мощности 0,3 кВт, что недопустимо.

Переключение со схемы соединения в Δ на схему соединения в Y при $m_c = 0,5$ понижает КПД с $h_{m_c \Delta} = 0,875$ до $h_{m_c Y} = 0,86$.

При схеме соединения в Δ и $m_c = 0,3$ ($U_{\text{фн}\Delta} = 380$ В)

$$1. I_{\text{ф}0\Delta} = 2,157 \text{ А};$$

$$2. \frac{I_{\text{ф}0\Delta}}{I_{\text{фн}\Delta}} = \frac{2,157}{5,38} = 0,4;$$

$$3. \frac{I'_{2\text{н}}}{I_{\text{фн}\Delta}} = 0,81;$$

$$4. \frac{I'_2}{I'_{2\text{н}\Delta}} = \sqrt{0,3 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1}}{7,67 + \sqrt{7,67^2 - 1}}} = 0,293, \quad b_c = \frac{b_{\text{н}}}{m_c} = \frac{2,3}{0,3} = 7,67, \quad k_U = 1;$$

$$5. \cos j'_{\Delta} = \sqrt{\frac{7,67 + \sqrt{7,67^2 - 1}}{2 \cdot 7,67}} = 0,998, \quad \sin j'_{\Delta} = \sqrt{1 - 0,998^2} = 0,063;$$

$$6. Q_{\Delta} = 3 \cdot 380 \cdot 5,38 (0,81 \cdot 0,293 \cdot 0,063 + 0,4) = 2545,3 \text{ вар} \approx 2,545 \text{ квар};$$

$$7. I_{1\text{ф}\Delta} = 5,38 \sqrt{(0,81 \cdot 0,293 \cdot 0,063 + 0,4)^2 + 0,81^2 \cdot 0,293^2 \cdot 0,998^2} = 2,57 \text{ А};$$

$$8. s_{\text{н}} = 5,33 \text{ \%};$$

$$9. \sum \Delta P_{1\Delta} = 40 + 429 + 134,6 \cdot \frac{2,57^2}{5,38^2} + 227,38 \times 0,293^2 = 519,16 \text{ Вт} \approx 0,519 \text{ кВт};$$

$$10. \cos j_{m_c \Delta} = \frac{0,3 \cdot 4 + 0,519}{\sqrt{2,545^2 + (0,3 \cdot 4 + 0,519)^2}} = 0,56;$$

$$11. h_{m_c \Delta} = \frac{4}{4 + 0,519} = 0,885;$$

При схеме соединения в Y и $m_c = 0,3$ ($U_{\text{фн}Y} = 220$ В)

$$1. I_{\text{ф}0Y} = 1,08 \text{ А};$$

$$2. \frac{I_{\text{ф}0Y}}{I_{\text{фн}Y}} = 0,116;$$

$$3. \frac{I'_{2H}}{I_{\Phi H Y}} = 0,96;$$

$$4. \frac{I'_2}{I'_{2H Y}} = \sqrt{0,3 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1}}{2,55 + \sqrt{2,55^2 - 1}}} = 0,517,$$

$$\text{здесь } b_{cY} = \frac{b_H \cdot k_U^2}{m_c}, \quad b_{cY} = \frac{2,3}{0,3} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 = 2,55, \quad k_U = \frac{1}{\sqrt{3}};$$

$$5. \cos j'_Y = \sqrt{\frac{2,55 + \sqrt{2,55^2 - 1}}{2 \cdot 2,55}} = 0,98, \quad \sin j'_Y = \sqrt{1 - 0,98^2} = 0,2;$$

$$6. Q_Y = 3 \cdot 220 \cdot 9,3(0,96 \cdot 0,517 \cdot 0,2 + 0,116) = 1,32 \times 10^3 \text{ квар};$$

$$7. I_{1\Phi Y} = 9,3 \sqrt{(0,96 \cdot 0,517 \cdot 0,2 + 0,116)^2 + 0,96^2 \cdot 0,517^2 \cdot 0,98^2} = 4,95 \text{ А};$$

$$8. s_H = 5,33 \text{ \%};$$

$$9. \sum \Delta P_{1Y} = 40 + 143 + 362,5 \cdot \frac{4,95^2}{9,3^2} + 227,38 \cdot 0,517^2 = 346,47 \text{ Вт};$$

$$10. \cos j_{m_c Y} = \frac{0,3 \cdot 4 + 0,346}{\sqrt{1,32^2 + (0,3 \cdot 4 + 0,346)^2}} = 0,761;$$

$$11. h_Y = \frac{4}{4 + 0,346} = 0,92.$$

Вывод

Таким образом, в потреблении реактивной мощности выигрываем на $Q_{\Delta} - Q_Y = 2,545 - 1,32 = 1,225$ квар, а повышение коэффициента мощности с $\cos j_{m_c \Delta} = 0,56$ до $\cos j_{m_c Y} = 0,759$ происходит при уменьшении активных потерь на $\sum \Delta P_{1\Delta} - \sum \Delta P_{1Y} = 0,519 - 0,346 = 0,173$ кВт, что весьма выгодно.

Переключение со схемы соединения треугольником на схему соединения звездой при $m_c = 0,3$ повышает КПД с $h_{m_c \Delta} = 0,885$ до $h_{m_c Y} = 0,92$.

Список литературы

1. Капунцов Ю. Д. Электрооборудование и электропривод промышленных установок / Ю. Д. Капунцов, В. А. Елисе-ев, Л. А. Ильяшенко. – М.: Высш. шк., 1979. – 359 с.
2. Трехфазные электродвигатели АИР. Каталог. Прайс-лист.
3. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И. А. Сыромятников. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 528 с.

Рекомендовано до друку проф. Костіним М.О.