

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2026-52-66-69>

## ОЦЕНКА КПД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ВКЛЮЧАЕМОГО ПО СХЕМАМ «ЗВЕЗДА» И «ТРЕУГОЛЬНИК»

**Плотников С.М.**

*Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск, Россия*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, коэффициент мощности, КПД, электрические потери, потери в стали, гистерезисные потери, вихревые потери.

**Аннотация.** Произведен анализ коэффициента мощности и КПД асинхронного двигателя при включении его статорных обмоток по схеме «звезда» и «треугольник». Показано, что коэффициент мощности для обеих схем одинаков, а КПД на схеме «звезда» выше, чем на схеме «треугольник» при втрое большей нагрузке. Получено выражение КПД, учитывающее изменение электрических потерь в двигателе и соотношение гистерезисных и вихревых потерь в стали статора.

## EFFICIENCY ASSESSMENT OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR CONNECTED USING STAR AND DELTA CIRCUITS

**Plotnikov S.M.**

*Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia*

**Keywords:** asynchronous motor, power factor, efficiency, electrical losses, iron losses, hysteresis losses, eddy current losses.

**Abstract.** An analysis of the power factor and efficiency of an asynchronous motor with its stator windings connected in star and delta configurations is performed. It is shown that the power factor is the same for both configurations, and the efficiency in the star configuration is higher than in the delta configuration at three times the load. An efficiency expression is derived that takes into account the change in electrical losses in the motor and the ratio of hysteresis and eddy current losses in the stator steel.

Для повышения КПД асинхронного двигателя, работающего с переменной нагрузкой, его обмотки статора включают на схему «звезда» при малой нагрузке или на схему «треугольник» при полной нагрузке [1]. Нагрузка, при которой следует проводить такое переключение для конкретного двигателя, определена в [2]. Как при этом меняются коэффициент мощности и КПД двигателя, в известных источниках не указано.

Коэффициент мощности двигателя, включенного по схеме «звезда»

$$\cos \varphi_Y = \frac{P_Y}{S_Y},$$

где  $P_Y$  и  $S_Y$  – соответственно активная и полная мощности двигателя, включенного по схеме «звезда».

При включении по схеме «треугольник» активная и полная мощности утраиваются

$$\cos \varphi_{\Delta} = \frac{P_{\Delta}}{S_{\Delta}} = \frac{3P_Y}{3S_Y} = \cos \varphi_Y, \quad (1)$$

где  $P_{\Delta}$  и  $S_{\Delta}$  – соответственно активная и реактивная мощности двигателя, включенного по схеме «треугольник».

Из выражения (1) следует, что коэффициент мощности двигателя, включенного по схеме «звезда» будет такой же, как коэффициент мощности двигателя, включенного по схеме «треугольник» при втрое большей нагрузке. Иначе обстоит дело с КПД.

Если пренебречь добавочными потерями, которые включают в себя все виды трудноучитываемых потерь в двигателе и составляют менее 0,5% от мощности двигателя, то выражение КПД двигателя, включенного по схеме «звезда» имеет вид

$$\eta_Y = 1 - \frac{P_0 + P_{\text{мех}} + P_{\text{э}}}{P_1}, \quad (2)$$

где  $P_0$  – магнитные потери в статоре (потери холостого хода, потери в стали);  $P_{\text{мех}}$  – механические потери, обусловленные потерями на трение и вентиляцию;  $P_{\text{э}}$  – электрические потери в обмотках статора и ротора;  $P_1$  – номинальная мощность двигателя, включенного по схеме «звезда».

Электрические потери в двигателе, включенном по схеме «звезда», пропорциональны квадрату токов в обмотках статора и ротора

$$P_{\text{эY}} \equiv I^2 \cdot R_Y,$$

где  $R_Y$  – сопротивление обмоток в схеме «звезда».

При переключении на схему «треугольник» токи в статоре и роторе возрастают в 3 раза, а сопротивление обмоток уменьшается в  $\sqrt{3}$  раз, поэтому электрические потери в двигателе, включенном по схеме «треугольник»

$$P_{\text{э}\Delta} \equiv (3I)^2 \cdot R_{\Delta} = 9I^2 \cdot \frac{R_Y}{\sqrt{3}} = 5,2P_Y,$$

Таким образом, электрические потери возрастают в 5,2 раза, а механические потери не меняются, т.к. частота вращения ротора остается практически неизменной.

При переходе со схемы «звезда» на схему «треугольник» напряжение на обмотках статора повышается в  $\sqrt{3}$  раз, амплитуда магнитной индукции  $B_m$  в статоре, пропорциональная приложенному напряжению, также возрастает в  $\sqrt{3}$  раз, а магнитные потери  $P_0$ , пропорциональные индукции в степени  $\alpha$ , возрастают в  $(\sqrt{3})^{\alpha}$  раз. Значение  $\alpha$  зависит от соотношения гистерезисных потерь  $P_{\Gamma}$  и вихревых потерь  $P_{\text{в}}$  в магнитных потерях, причем  $P_{\Gamma} \equiv B_m^{1,6}$  (формула Штейнмеца), а  $P_{\text{в}} \equiv B_m^2$ , поэтому степень  $\alpha$  можно определить из выражения

$$\alpha = 1,6 \cdot \frac{P_{\Gamma}}{P_0} + 2 \cdot \frac{P_{\text{в}}}{P_0}.$$

Если считать, что гистерезисные потери составляют 30 % от магнитных потерь, а вихретоковые 70 %, что справедливо для большинства асинхронных двигателей, то коэффициент  $\alpha$  принимает значение

$$\alpha = 1,6 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,7 = 1,88.$$

Определение степени  $\alpha$  для магнитопровода конкретной электрической машины произведено в [3, 4] на основании результатов опыта холостого хода, проведенного при двух частотах перемагничивания или при двух значениях магнитной индукции в стали статора.

КПД двигателя, включенного по схеме «треугольник» при втрое большей нагрузке

$$\eta_{\Delta} = 1 - \frac{(\sqrt{3})^{\alpha} \cdot P_0 + P_{\text{мех}} + 5,2 \cdot P_{\Sigma}}{3P_1}. \quad (3)$$

Изменение КПД двигателя при его работе на двух схемах статорных обмоток рассмотрим на примере, приведенном в [5].

Трехфазный асинхронный двигатель при соединении обмоток статора звездой имеет следующие параметры: номинальная мощность  $P_1 = 16,7$  кВт,  $P_0 = 265$  Вт,  $P_{\Sigma} = 1240$  Вт,  $P_{\text{мех}} = 123$  Вт.

КПД двигателя, включенного по схеме «звезда» по формуле (2)

$$\eta_Y = 1 - \frac{265 + 123 + 1240}{16,7 \cdot 10^3} = 0,903.$$

КПД двигателя, включенного по схеме «треугольник» находим по формуле (3)

$$\eta_{\Delta} = 1 - \frac{(\sqrt{3})^{1,88} \cdot 265 + 123 + 5,2 \cdot 1240}{3 \cdot 16,7 \cdot 10^3} = 0,854.$$

Таким образом, при переходе асинхронного двигателя средней мощности со схемы «звезда» на схему «треугольник» при тройном возрастании нагрузки на валу КПД двигателя снижается на 5,6% за счет того, что мощность двигателя возрастает втрое, а электрические потери возрастают в 5,2 раза. При этом магнитные потери возрастают в  $(\sqrt{3})^{1,88} = 2,81$  раза – данное значение зависит от соотношения гистерезисной и вихретоковой составляющих потерь в стали и может изменяться для разных двигателей. Для двигателей малой мощности, у которых номинальные значения КПД более низкие, разница в КПД при включении обмоток статора на разные схемы будет более значительной.

### Список литературы

1. Плотников С.М. Определение рациональной загрузки асинхронного двигателя для переключения схемы статорных обмоток // Электричество. – 2023. – №10. – С. 64-68. – doi.org/10.24160/0013-5380-2023-10-64-68.
2. Патент №2853481 РФ. Способ управления асинхронным двигателем / С.М. Плотников. – Заявка №2025106444 от 18.03.2025; опубл. 24.12.2025, Бюл. №36.

3. Плотников С.М. Анализ методов определения потерь в магнитопроводе трансформатора // Измерительная техника. – 2022. – №1. – С. 52-57. – doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-52-57.
4. Плотников С.М., Иксиль Н. Определение составляющих потерь в стали магнитопроводов электрических машин // Измерительная техника. – 2023. – №9. – С. 53-58. – doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-9-53-58.
5. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990. – 463 с.

### References

1. Plotnikov S. M. Determination of an Induction Motor Rational Loading for Switching the Stator Windings Circuit // Electricity. 2022, no. 1, pp. 64-68. doi.org/10.24160/0013-5380-2023-10-64-68.
2. Patent No. 2853481 RU. Method of controlling an asynchronous motor / S.M. Plotnikov. – Appl. No. 2025106444 from 18.03.2025; publ. 24.12.2025, Bul. No. 36.
3. Plotnikov S.M. Analysis of the methods for determining losses in the transformer magnetic core // Measurement Techniques. 2023, no. 9, pp. 52-57. doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-52-57.
4. Plotnikov S.M., Iksil N. Determination of loss components in the steel of magnetic circuits of electrical machines // Measurement Techniques. 2023, no. 9, pp. 53-58. doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-9-53-58.
5. Katsman M.M. Electrical machines. – M.: Higher school, 1990. – 463 p.

|                                                                                                                        |                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Плотников Сергей Михайлович</b> – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы обеспечения движения» | <b>Plotnikov Sergey Mikhailovich</b> – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of "Traffic support systems" |
| smplotnikov@rambler.ru                                                                                                 |                                                                                                                                                    |

*Received 21.02.2026*