

УТОЧНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОПТИМАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРА

Плотников С.М.^{1,2}, Колмаков В.О.²

¹*Сибирский государственный университет имени М.Ф. Решетнева;*

²*Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск,
Россия*

Ключевые слова: коэффициент оптимальной загрузки, опыт холостого хода, опыт короткого замыкания, магнитная индукция.

Аннотация. Предложена уточненная формула коэффициента оптимальной загрузки трансформатора, полученная с учетом паспортных значений потерь холостого хода и потерь короткого замыкания. Формула учитывает электрические потери в опыте холостого хода и магнитные потери в опыте короткого замыкания, которые зависят от соотношения гистерезисной и вихревой составляющих потерь.

CLARIFICATION OF THE OPTIMAL LOAD FACTOR IN TRANSFORMER

Plotnikov S.M.^{1,2}, Kolmakov V.O.²

¹*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology;*

²*Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia*

Keywords: optimal load factor, idle run experience, short circuit experience, magnetic induction.

Abstract. A refined formula for the optimal load factor of a transformer is proposed, obtained taking into account the passport values of no-load losses and short-circuit losses. The formula takes into account electrical losses in the no-load test and magnetic losses in the short-circuit test, which depend on the ratio of the hysteresis and eddy current components. The formula takes into account electrical losses in the no-load test and magnetic losses in the short-circuit test, which depend on the ratio of the hysteresis and eddy current components of the losses.

Чтобы трансформатор работал с максимальным КПД, он должен быть загружен на величину, определяемую коэффициентом оптимальной загрузки

$$\beta_{\max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{эл}}}},$$

где P_0 – магнитные потери; $P_{\text{эл}}$ – электрические потери.

Значения P_0 и $P_{\text{эл}}$ определить сложно, поэтому в практических расчетах эти величины заменяют соответственно потерями холостого хода P_{xx} и потерями короткого замыкания $P_{\text{к}}$, а коэффициент оптимальной загрузки определяют по формуле

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_{\text{xx}}}{P_{\text{к}}}}, \quad (1)$$

Считается, что P_{xx} – это постоянные магнитные потери, а $P_{\text{к}}$ – переменные электрические потери, которые определяются соответственно

опытами холостого хода и короткого замыкания и содержат поправки на несинусоидальность приложенного напряжения, на отклонение частоты этого напряжения, на отклонение температуры обмотки, на потребляемую измерительными приборами мощность [1], однако в величине P_{xx} не учитывается влияние тока I_0 , протекающего в обмотке при проведении опыта холостого хода, поэтому потери P_{xx} не являются строго постоянными магнитными потерями, т.к. содержат переменную электрическую составляющую. Кроме того, в величине P_k не учитывается наличие некоторых магнитных потерь при проведении опыта короткого замыкания, поэтому потери P_k не являются строго переменными электрическими потерями, т.к. содержат постоянную магнитную составляющую. В результате этого коэффициент оптимальной нагрузки трансформатора по формуле (1) вычисляется неточно.

При проведении опыта холостого хода трансформатор потребляет ток холостого хода I_0 , который вызывает электрические потери, пропорциональные квадрату этого тока. В паспортных данных этот ток указан как $I_0\%$ в процентах от номинального тока, поэтому электрические потери,

вызываемые этим током, составляют $\left(\frac{I_0\%}{100}\right)^2$ от потерь короткого замыкания

P_k , которые измеряют в опыте короткого замыкания при номинальном токе. Выражение постоянных потерь (потери в стали)

$$P_c = P_{xx} - \left(\frac{I_0\%}{100}\right)^2 \cdot P_k.$$

Опыт короткого замыкания проводят при пониженном напряжении, которое в паспортных данных указано как $U_k\%$, т.е. в процентах от номинального напряжения, при котором проводят опыт холостого хода. При проведении данного опыта ваттметр показывает сумму электрических и некоторых магнитных потерь. Магнитные потери - это сумма потерь на вихревые токи P_v и на гистерезис P_g , причем потери на гистерезис для электротехнической стали зависят от магнитной индукции в степени 1,6, а потери на вихревые токи от магнитной индукции в квадрате [2-5]. При постоянстве частоты перемагничивания имеют место соотношения $P_g \equiv B_m^{1,6}$, $P_v \equiv B_m^2$, где B_m - максимальное значение магнитной индукции. Полные магнитные потери пропорциональны индукции в степени α , которая зависит от соотношения P_g и P_v . Если все потери в стали считать гистерезисными, то $\alpha = 1,6$, а если вихретоковыми, то $\alpha = 2$. На рисунке 1 представлена зависимость степени α , в которой магнитная индукция входит в полные магнитные потери, от соотношения гистерезисных потерь P_g (линия 1) и вихретоковых потерь P_v (линия 2). В [1] указано, что при индукциях в магнитной системе не менее 1,2 Тл для холоднокатаной электротехнической стали доля потерь $P_g = 0,5$, $P_v = 0,5$ ($\alpha = 1,8$) а для горячекатаной стали $P_g = 0,7$, $P_v = 0,3$ ($\alpha = 1,72$). Коэффициент α определяем на пересечении

вертикалей, проведенных из относительных значений P_T и P_B на оси абсцисс, с соответствующими линиями потерь.

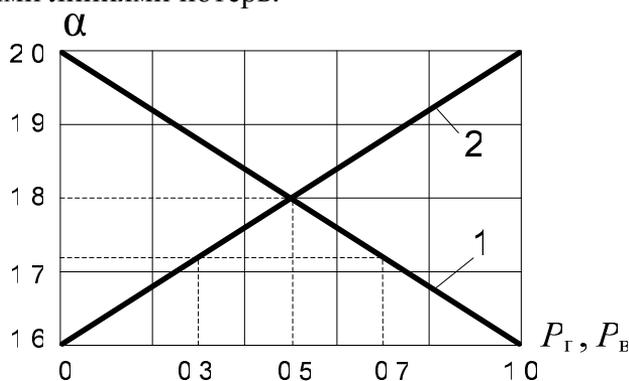


Рис. 1. Зависимость коэффициента α от соотношения потерь

Магнитная индукция пропорциональна приложенному напряжению, поэтому магнитные потери при пониженном напряжении U_K в $\left(\frac{U_K\%}{100}\right)^\alpha$ раз меньше магнитных потерь при номинальном напряжении, Электрические переменные потери можно найти из выражения

$$P_{эл} = P_K - \left(\frac{U_K\%}{100}\right)^\alpha \cdot P_{xx}.$$

Формула уточненного коэффициента оптимальной загрузки трансформатора имеет вид

$$\beta_{опт} = \sqrt{\frac{P_{xx} - \left(\frac{I_0\%}{100}\right)^2 \cdot P_K}{P_K - \left(\frac{U_K\%}{100}\right)^\alpha \cdot P_{xx}}}. \quad (2)$$

Уточнение коэффициента оптимальной загрузки рассмотрим на примере сухого трансформатора ТСЗИ-4 мощностью $P_H = 4$ кВА, имеющего следующие паспортные данные: $P_{xx} = 30$ Вт, $P_K = 130$ Вт, $I_0 = 16\%$, $U_K = 2,6\%$. Сердечник выполнен из холоднокатаной стали ($\alpha = 1,8$). Коэффициент оптимальной загрузки по формуле (1) $\beta_{опт1} = 0,480$, по формуле (2) – $\beta_{опт2} = 0,453$. Расчеты показали, что КПД трансформатора при номинальной нагрузке ($\beta=1$) и коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$ $\eta_H = 0,953$. КПД трансформатора при нагрузке на 45,3% ($\beta_{опт2} = 0,453$) и $\cos\varphi_2 = 0,8$ $\eta_{опт2} = 0,957$.

Таким образом, при нагрузке данного трансформатора до значения, найденного по формуле (2), его КПД имеет максимальное значение. Для трансформаторов малой мощности с большим током холостого хода коэффициент оптимальной загрузки, рассчитанный по традиционной формуле (1), является завышенным, а для трансформаторов большой мощности с высоким напряжением короткого замыкания – заниженным.

Список литературы

1. ГОСТ 3484-77. Трансформаторы силовые. Методы испытаний.
2. Плотников С.М. Определение потерь на вихревые токи и на гистерезис в магнитопроводах электрических машин // Измерительная техника. – 2020. – №11. – С. 54-58. – doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-11-54-58.
3. Плотников С.М., Колмаков О.В. Решение актуальных вопросов в теории трансформаторов // Известия вузов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, №3. – С. 5-11. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-3-5-11.
4. 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.
5. 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.

References

1. GOST 3484-77. Power transformers. Test methods.
2. Plotnikov S.M. Determination of Eddy-Current and Hysteresis Losses in the Magnetic Circuits of Electrical Machines // Measurement Techniques. 2020, vol. 63, pp. 904-909. doi.org/10.1007/s11018-021-01866-9.
3. Plotnikov S.M., Kolmakov O.V. Solving current issues in the theory of transformers // News of universities. Electromechanics. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 5-11. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-3-5-11.
4. Plotnikov S.M. Analysis of the methods for determining losses in the transformer magnetic core // Measurement Techniques. 2022, vol. 65, pp. 59-64. doi.org/10.1007/s11018-022-02048-x.
5. Plotnikov S.M., Iksil N. Determination of the components of losses in the steel of magnetic cores of electrical machines // Measuring technology. 2023, no. 9, pp. 53-58. doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-9-53-58.

Плотников Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор	Plotnikov Sergey Mikhailovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor
Колмаков Олег Витальевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой	Kolmakov Vitaly Olegovich – candidate of technical sciences, associate professor, head of the department
smplochnikov@rambler.ru	

Received 11.12.2023